



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROCESOS DE PASTEURIZACIÓN
DE ALIMENTOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DE
CICLO DE VIDA

Presentado por

Díaz Murillo, José Carlos

Para la obtención del

Máster Universitario en Ingeniería Ambiental

Curso: 2020/2021

Fecha: 06/09/2021

Tutor: Robles Martínez, Ángel

Cotutor: Herraiz Cardona, Isaac



Índice

1. Antecedentes.....	2
2. Introducción.....	2
2.1. Industria Alimentaria	3
2.1.1. Tratamientos de Pasteurización y Envasado.....	3
2.2. Metodologías para Evaluar Impactos Ambientales.....	9
2.2.1. Análisis y Evaluación del Riesgo Ambiental	10
2.2.2. ACV	12
2.2.3. Método Ad – Hoc	15
2.2.4. Matriz de Leopold	16
2.3. Aplicación de ACV a procesos de Pasteurización	16
2.3.1. Objetivo y Alcance	17
2.3.2. Unidad Funcional	18
2.3.3. Calidad de los Datos.....	18
2.3.4. Límites del Sistema.....	19
2.3.5. Análisis del Inventario	20
2.3.6. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida	22
2.3.7. Interpretación de Resultados y Conclusiones	24
3. Objetivos.....	30
4. Metodología	30
4.1. Objetivo y Alcance	31
4.2. Análisis del Inventario	33
4.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida	39
4.4. Interpretación de Resultados.....	41
5. Propuestas de Mejora	55
6. Conclusiones.....	56
7. Anexo al Trabajo Fin de Máster	58
8. Abreviaturas	61
Referencias	64

1. Antecedentes

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) surge en el contexto laboral actual del autor, en la pyme LOMARTOV, dedicada a la evaluación de la sostenibilidad de procesos de producción y/o nuevos productos en proyectos europeos y contrataciones privadas. En concreto, la idea nace de las necesidades identificadas en el marco del proyecto “FuntomP” (Functionalized Tomato Products; Grant Agreement number 2032, PRIMA Sec 1 Agro-food Value Chain 2020), que tiene como objetivo general la reformulación de productos tradicionales de la dieta Mediterránea basados en tomate, teniendo en cuenta las tendencias actuales del consumidor con respecto a los alimentos funcionales. En este contexto, se realiza una evaluación de sostenibilidad de nuevos procesos de tratamiento de los alimentos testados, comparándolos con técnicas tradicionales, con la finalidad de minimizar el impacto ambiental y económico en la futura implementación del proyecto. “FuntomP” centra su investigación principalmente en procesos de extracción de proteínas y nutrientes. No obstante, aunque también se proponen distintas alternativas para los tratamientos de pasteurización, su evaluación medioambiental no está contemplada en el marco del proyecto. Por tanto, el presente TFM da respuesta a esta necesidad, evaluando el impacto medioambiental de distintas alternativas de tratamiento de pasteurización de alimentos desde una perspectiva de ciclo de vida. Aunque la aplicación se centra en productos de origen vegetal, los principales resultados derivados del presente trabajo pueden considerarse de notable relevancia para el conjunto del sector de la industria de la alimentación.

2. Introducción

En el marco de la globalización, la sostenibilidad es una de las piezas clave para crear un futuro de bienestar a largo plazo. El efecto del cambio climático es notablemente visible en nuestro día a día, por lo que los consumidores somos cada vez más exigentes con la conservación del medio que nos rodea, lo que se traduce a la industria, que debe enfrentarse a grandes retos para satisfacer esta demanda cambiante.

Actualmente, se ha fijado un marco de actuación europeo en materia de clima y energía hasta el año 2030, contemplando objetivos y metas para su consecución. Acuerdos como el pacto verde europeo y el avance hacia una economía climáticamente neutra. En el caso de España, a nivel estatal se desarrollan planes integrales de energía y clima (PNIEC 2021-2030), donde se plantean mecanismos de actuación y buenas prácticas para paliar y disminuir los impactos medioambientales. Programas nacionales de fomento y apoyo a la producción ecológica, adoptando medidas de contribución al desarrollo de la producción ecológica.

Los instrumentos y herramientas de control de la calidad y medio ambiente en el sector industrial se centran en la evaluación de impactos ambientales derivados de los distintos procesos productivos. Desde un enfoque ambiental se estudian los riesgos y daños que ocasionan las industrias sobre los recursos, al ecosistema y a la salud humana.

Por tanto, este trabajo se centra en el diseño y aplicación de un modelo basado en la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para determinar el impacto ambiental

de distintos procesos de pasteurización de productos alimentarios. Para ello, en la presente introducción se recoge el estado del arte de los procesos de pasteurización empleados en la industria alimentaria (nuevos y convencionales). Seguidamente, se presentan las distintas metodologías para la evaluación de impactos ambientales, con especial hincapié en el ACV. Por último, se ofrece una revisión científica de la aplicación de estos análisis en el campo específico de la pasteurización de jugos vegetales, conectando con las necesidades del proyecto europeo FunTomP.

2.1. Industria Alimentaria

La industria alimentaria posee gran valor añadido en toda su cadena agroalimentaria, con el paso del tiempo se va ampliando la responsabilidad social corporativa de las organizaciones, mejorando sus objetivos en materia de competitividad y valor añadido. A nivel europeo existen plataformas tecnológicas europeas del ámbito alimentario que definen la producción alimentaria sostenible como el reto más importante al que se enfrentará la industria alimentaria europea, entre ellas se encuentra “Food for Life”. Según Capson-Tojo et al. (2021), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2015), ratificó que el desperdicio de alimentos a nivel global genera anualmente 4.4 GtCO₂ eq., alrededor de un 8% del total de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI).

Los desafíos globales en la mejora de la seguridad y calidad alimentaria son cada vez más conscientes, el consumidor demanda un futuro industrial ecológico, donde no esté comprometida la nutrición, funcionalidad y/o características sensoriales. Existe un creciente interés por las mejoras tecnológicas existentes y por desarrollar aplicaciones tecnológicas para los retos futuros de conservación de alimentos. De hecho, la investigación desarrollada en la última década ha despertado técnicas alternativas de conservación de alimentos.

2.1.1. Tratamientos de Pasteurización y Envasado

La pasteurización, proceso térmico creado por Pasteur en 1864, tiene como objetivo la eliminación parcial de la flora banal y la eliminación total de la flora microbiana patógena, además de inactivar enzimas perjudiciales. Es un tratamiento térmico relativamente suave (temperaturas generalmente inferiores a 100 °C), que se utiliza para prolongar la vida útil de los alimentos durante varios días o meses.

El calentamiento de los alimentos se puede llevar a cabo con vapor, agua caliente, calor seco o corrientes eléctricas, y se enfrían inmediatamente después de haber sido sometidos al tratamiento térmico.

Los métodos térmicos tradicionales se utilizan en la industria alimentaria por su eficacia y por la inocuidad de los productos generados. Estas técnicas se basan en la transferencia indirecta de calor al producto, por principios de conducción y convección, utilizando como agente caloportador vapor de agua o agua caliente, generados habitualmente de forma externa por la combustión de combustibles fósiles. Este tipo de

procesamiento a menudo conlleva algunas restricciones e ineficiencias energéticas derivadas de la lenta conducción del calor, pérdidas de calor a través de las superficies del equipo y daño térmico de los alimentos por sobrecalentamiento, debido al tiempo necesario para conducir suficiente calor al centro termal de los mismos. Un tratamiento térmico prolongado en exceso implica ineficiencia en el uso de recursos naturales, pero también puede causar desnaturalización indeseable de proteínas, pérdida de vitaminas y compuestos de sabor volátiles que conducen al deterioro de los alimentos, para finalmente reducir la eficiencia de la cadena alimentaria (Lado y Yousef., 2002; Pereira y Vicente., 2010).

Existen diferentes estrategias de reducción en origen de la contaminación industrial que permiten evitar o reducir sobrecalentamientos, tales como cambios en el proceso basados en técnicas de calentamiento rápido, centradas en una interacción directa más uniforme entre radiofrecuencias (RF) y/o energía microondas (MW). Estos dos tipos de tecnologías electromagnéticas para el procesamiento de alimentos han generado recientemente un mayor interés industrial, ya que se constituyen formas de calentamiento en las que se genera energía térmica directamente dentro de los alimentos, lo que permite reducir tiempos de cocción excesivos y conllevan, consecuentemente, implicaciones directas en términos de eficiencia energética y calidad alimentaria (Pereira y Vicente., 2010).

Como alternativa a los métodos de conservación no térmicos, se incluyen, por ejemplo, la alta presión hidrostática (HHP) y el envasado en atmósfera modificada (MAP), que permiten el procesamiento de alimentos a temperaturas inferiores que las utilizadas durante la pasteurización térmica, por lo que los sabores, los nutrientes esenciales y las vitaminas experimentan cambios mínimos o nulos.

Aunque algunas de las ventajas y limitaciones asociadas a la calidad alimentaria derivada de la aplicación de nuevas tecnologías han sido descritas por varios autores (Pardo y Zufía., 2012), todavía se requiere de estudios que analicen las implicaciones ambientales derivadas de la aplicación de su aplicación, identificando por tanto potenciales mejoras en la conservación de alimentos que podrían implicar la sostenibilidad de un producto a lo largo de todo su ciclo de vida.

El tratamiento de conservación térmica ha sido señalado como una de las etapas de mayor demanda energética en el sector de procesamiento de alimentos (EC., 2006). En comparación con los procesos convencionales de base térmica, los métodos alternativos de procesamiento no térmicos se consideran más eficientes en lo que respecta al uso de recursos. Además, los métodos de conservación mejorados, como el procesamiento a alta presión, han demostrado su eficacia para aumentar la vida útil de los productos alimenticios (sólidos, líquidos o embalajes) al tiempo que reduce las pérdidas nutricionales (Fernández García et al., 2001; Patras et al., 2009), cubriendo las necesidades y la demanda calórica de los alimentos, por lo que podrían representar un paso adelante hacia cadenas alimentarias más eficientes y sostenibles.

Actualmente, existen pocas referencias sobre análisis del ciclo de vida desde la perspectiva ambiental específica para la industria alimentaria. Calderón et al. (2010) investigó el ciclo de vida de una comida preparada enlatada, basada en legumbres cocidas y carne de cerdo. La producción de ingredientes se identificó como la etapa de mayor contribución al impacto total. A pesar de que el uso de energía en dicha etapa

(gas y electricidad) tan solo representó un 25% del impacto global asociado al consumo de combustibles fósiles. Tanto el agotamiento de recursos abióticos (abiotic depletion) como el potencial de efecto invernadero (global warming) fueron identificadas como dos de las categorías de impacto de mayor carga ambiental, debido principalmente al transporte.

Además, la etapa de procesamiento y conservación de alimentos ha sido señalada considerablemente por varios autores (Andersson et al., 1998), las técnicas como la deshidratación o esterilización han sido estimadas con consumos alrededor del 29% de la energía total utilizada en el sector alimentario (CE., 2006).

A continuación, se desarrollan las tecnologías aplicables al proceso de pasteurización, identificando y evaluando las tendencias en la aplicación de las mismas, así como la importancia de los usos dentro de la cadena de valor en la industria alimentaria.

2.1.1.1. Pasteurización térmica convencional en Autoclave (AC)

La pasteurización convencional llevada a cabo en autoclave (AC) se caracteriza por la aplicación de vapor a alta presión y altas temperaturas al producto que se quiera pasteurizar durante un determinado periodo de tiempo. Su eficacia radica en la eliminación de patógenos, bacterias y microorganismos.

El proceso convencional de pasteurización mediante autoclave considera las siguientes fases:

- Calentamiento del producto, en la que se utiliza un medio de calefacción (vapor de agua, etc.) para asegurar una rápida transmisión de calor al producto.
- Mantenimiento de la temperatura, en la que el producto se debe mantener a una temperatura constante durante un periodo definido.
- Enfriamiento rápido, que consiste en un enfriamiento rápido e involucra dispositivos específicos que garantizan una rápida caída de temperatura en el producto.

2.1.1.2. Campos Eléctricos Pulsados (PEF)

El tratamiento de campo eléctrico pulsado (PEF), también conocido como electroporación o electropermeabilización, es un proceso no térmico en el que se aplica un campo eléctrico externo a una célula viva durante un período muy corto (desde varios nanosegundos hasta varios milisegundos). El mecanismo exacto de la permeabilización de la membrana aún no se comprende con precisión, pero se acepta que la electroporación consta de cuatro etapas diferentes que incluyen (Saulis., 2010): (a) aumento del potencial transmembrana de la membrana citoplasmática debido a la carga de la membrana celular por la aplicación campo eléctrico externo, (b) creación de pequeños poros hidrófilos metaestables si se alcanza un umbral de potencial transmembrana (0,2-1,0 V), (c) evolución del número y/o tamaño de los poros creados

durante el tratamiento con PEF, y (d) Etapa de postratamiento de PEF con fuga de compuestos intracelulares, entrada de sustancias extracelulares, es decir, como electroporación irreversible o sellado de poros y recuperación de la integridad de la membrana, es decir, electroporación reversible.

La efectividad de la electropermeabilización de las membranas celulares depende de varios parámetros del proceso (intensidad del campo eléctrico, tiempo de tratamiento, energía específica, forma del pulso, ancho del pulso, frecuencia y temperatura), modo de tratamiento (por lotes, continuo), configuración de la cámara de tratamiento (colineal, coaxial y paralelo) (Van den Bosch., 2007), características fisicoquímicas de la matriz tratada (pH y conductividad), características de las células tratadas (tamaño, forma, membrana y estructura de la envoltura) y estado (suspensión, sólido, semisólido) (Vorobiev y Lebovka., 2009). El PEF es una herramienta ecológica prometedora en el procesamiento de alimentos, ya que abre una amplia gama de aplicaciones debido al fenómeno descrito de aumento de la permeabilidad o alteración de la membrana celular a través de la electroporación. La aplicación se puede clasificar según la extensión del campo eléctrico externo aplicado y la energía específica (Toepfl et al., 2006).

2.1.1.3. Microondas (MW)

Las microondas no solo se utilizan para secar, sino que también son una tecnología eficaz para hornear, extraer, pasteurizar y esterilizar. El calentamiento por microondas (MW) se puede utilizar para aportar energía térmica y eliminar microorganismos en los alimentos, por lo que se ha investigado para pasteurización de diferentes alimentos. El magnetrón transforma la energía eléctrica en energía electromagnética que es aplicada en forma de microondas a frecuencias de 915 MHz o 2450 MHz para generar calor en los productos. La energía electromagnética a estas frecuencias puede inducir la rotación y la fricción entre las moléculas de agua en los alimentos, provocando la generación de calor interno. Por tanto, la energía MW que penetra en los alimentos sólidos puede producir efectos de calentamiento, aumentando rápidamente la temperatura interna de los mismos. Comparado con el calentamiento convencional con agua o vapor, la energía MW tiene el potencial de proporcionar un mayor volumen de calor de forma uniforme y rápida.

El procesamiento por microondas presenta como ventajas un menor tiempo de puesta en marcha, control de energía preciso, ahorro de espacio, calentamiento uniforme mayor valor nutritivo y calentamiento más rápido (Sumnu., 2001). Por lo tanto, reduce el largo tiempo de procesamiento del calentamiento convencional que conduce a una disminución de la calidad de los alimentos en términos de color, textura y valor nutritivo. Sin embargo, para la producción a escala industrial, debido al problema de falta de uniformidad, se prefieren más los sistemas asistidos por microondas.

Para productos líquidos, como técnica de conservación se puede proponer la pasteurización asistida por MW (Siguemoto., 2018). La tecnología de pasteurización térmica asistida por MW es una tecnología que combina el calentamiento superficial del agua con el calentamiento central por MW. La ventaja de esta tecnología proviene de los efectos combinados del calentamiento del agua y del microondas. El uso de agua reduce el calentamiento no uniforme, mientras que el uso de MW reduce el tiempo para

que los alimentos alcancen las temperaturas deseadas. Sigue siendo un método térmico, pero tiene la ventaja de un tiempo de procesamiento corto de 35 min (Pardo y Zufía., 2012) y, por lo tanto, tendrá menos efecto en la calidad de los alimentos.

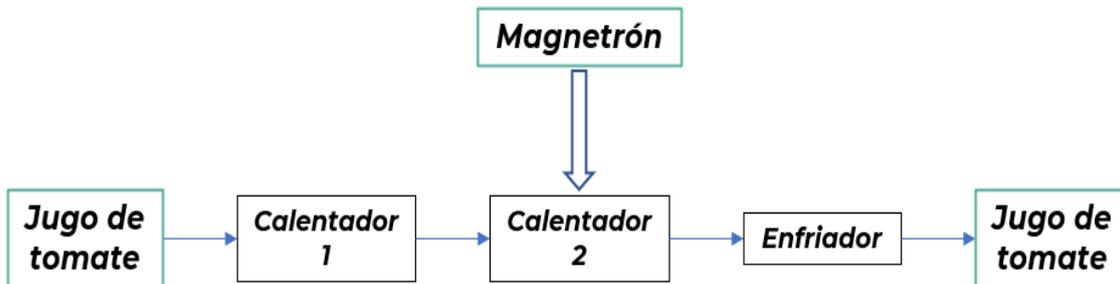


Figura 1. Proceso Microondas (MW).

2.1.1.4. Alta Presión Hidrostática (HHP)

La alta presión hidrostática (HHP), también conocida como ultra presión, es una técnica de pasteurización en frío que implica someter a elevadas presiones (100-1000 MPa) a los productos alimentarios (Santhirasegaram et al., 2016).

A medida que la presión se transmite en un líquido, los productos alimentarios (sólidos, líquidos o embalajes) se cargan en recipientes de acero que se llenan de agua. A continuación, la presurización se realiza mediante compresión directa o indirecta. Por cada 100 MPa de presión aplicada, hay un aumento de temperatura del producto (aproximadamente 3 ° C para el agua) (Morris et al., 2007; López-Gómez et al., 2009).

HHP inactiva las células microbianas rompiendo los enlaces no covalentes y dañando las membranas celulares. Además, este proceso causa la desnaturalización de las proteínas, interrumpiendo las funciones celulares y eventualmente resultando en la muerte celular, por lo que se proporciona pasteurización. Varios estudios han utilizado HHP para productos de tomate y han demostrado que la calidad del producto es más alta con una vida útil más larga (Jež et al., 2020).

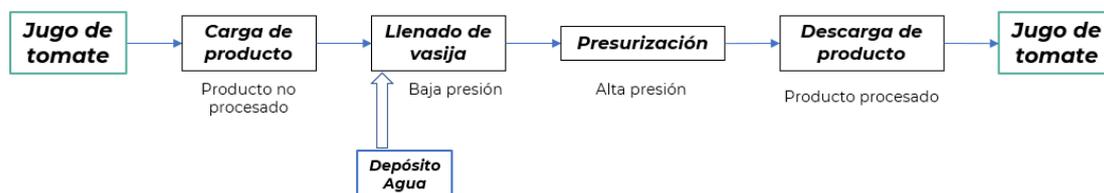


Figura 2. Proceso Alta Presión Hidrostática (HHP).

2.1.1.5. Ultravioleta (UV)

El sistema de luz ultravioleta (UV) es una tecnología no térmica que ha adquirido interés entre los investigadores de alimentos. Numerosos estudios han demostrado que el tratamiento con luz germicida UV tiene promesas considerables en el procesamiento de

jugos como alternativa al tratamiento térmico tradicional (Shah et al., 2016). En comparación con el método tradicional de pasteurización térmica para alimentos líquidos, como el de alta temperatura y tiempo corto, se demostró que el tratamiento con UV tiene un efecto mínimo en la calidad del jugo. La luz UV (especialmente a una longitud de onda de 253,7 nm – UV-C) tiene un efecto germicida sobre los microorganismos e impide la transcripción y reproducción de las células, formando dímeros en la estructura de la timina en su ADN. Esta tecnología ha sido aprobada por la Administración de Alimentos y Medicamentos para la pasteurización de jugos de frutas y estudios recientes informaron que la UV puede usarse como una alternativa a la pasteurización térmica sin ningún cambio significativo o indeseable en la calidad fisicoquímica, nutricional y sensorial de los jugos (Kaya y Unluturk., 2019; Mehta et al., 2019; Pendyala et al., 2020). Otra característica importante de la pasteurización UV es que es una alternativa de bajo costo a la pasteurización térmica para pequeñas operaciones de procesamiento. También es muy fácil de instalar. Sin embargo, debido a la presencia de compuestos de color, solutos orgánicos y materia en suspensión, los alimentos líquidos, como los jugos frescos y las bebidas, transmiten relativamente poca luz ultravioleta, y esta baja transmisión reduce la eficiencia del rendimiento de los procesos de pasteurización ultravioleta (Koutchma., 2008). Por lo tanto, si se añade un subproceso de calentamiento suave a la luz ultravioleta, se mejoraría la eficiencia del proceso global.

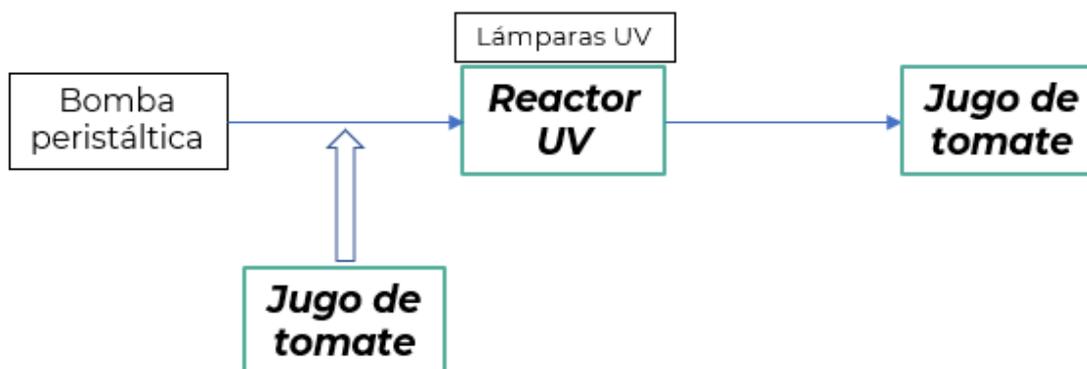


Figura 3. Proceso Ultravioleta (UV).

2.1.1.6. Ultrasonidos de Alta Potencia (HPU)

La tecnología de ultrasonidos de alta potencia (HPU) consiste en la aplicación de ondas mecánicas con frecuencia por encima del umbral de audición humana (> 16 kHz). Dependiendo de su frecuencia e intensidad, el espectro ultrasónico se puede dividir en ultrasonidos de baja frecuencia (20 - 100 kHz) alta potencia (> 1 W/cm²) ultrasonidos (HPU) y alta frecuencia (> 100 kHz) de baja potencia (< 1 W/cm²) ultrasonido. La HPU se ha investigado como tecnología no térmica para inactivar varios microorganismos en jugos (Baboli et al., 2020). El mecanismo de los ultrasonidos en la inactivación de microorganismos está asociado a un fenómeno llamado cavitación acústica que genera temperaturas muy elevadas de hasta 5500 °C y presiones de hasta 50 MPa con una vida útil de 1 μs (Jambrak et al., 2015) que provocan graves daños a las paredes celulares, incluidas picaduras en sus superficies y erosionándolos. Aunque el

ultrasonido de alta intensidad es letal para los microorganismos, los reactores ultrasónicos existentes muestran una baja eficiencia de proceso, lo que se refleja en los largos tiempos de reducción de 5 log de los microorganismos objetivo (Baboli et al., 2020). Por lo tanto, suele ser mejor acompañar los ultrasonidos con un tratamiento leve y pesado. Además del efecto microbiano de la sonicación, también se informó que el tratamiento ultrasónico de jugos de frutas mejora la vida útil con efectos negativos mínimos en la calidad de los jugos de frutas y reduce los costos de procesamiento en comparación con el procesamiento térmico convencional (Bermúdez-Aguirre et al., 2011).

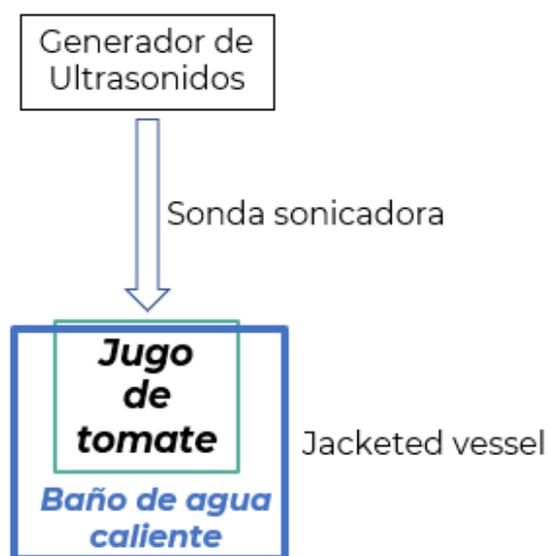


Figura 4. Proceso Ultrasonidos de Alta Potencia (HPU)

2.1.1.7. Envasado en atmósfera modificada (MAP)

La modificación de la atmósfera dentro del envase o embalaje se basa en disminuir la concentración de oxígeno, mientras aumenta el contenido de dióxido de carbono y/o nitrógeno. Esta técnica ha demostrado ser útil para prolongar significativamente la vida útil de los productos alimenticios perecederos a temperaturas frías. El envasado en atmósfera modificada (MAP) incluyendo la refrigeración, se ha vuelto cada vez más popular como complemento a las técnicas de pasteurización, ya que ha traído cambios importantes en el almacenamiento, distribución, y comercialización de productos crudos y procesados para satisfacer demandas de los consumidores (Özogul., 2004).

2.2. Metodologías para Evaluar Impactos Ambientales

Las metodologías de evaluación de impacto ambiental son instrumentos y métodos empleados para verificar estudios de impacto. Entre estas metodologías se encuentra la evaluación de impacto ambiental, el eco-etiquetado, el análisis del ciclo de vida (ACV), o el cálculo de la huella de carbono y/o hídrica. La integración facilita la identificación, predicción, cuantificación, y valoración de impactos ambientales y alternativas. Los

métodos no son generales, se refieren a impactos específicos y la especificidad que presentan no es muy alta. Las metodologías se clasificaban según su función, de planeación, implementación, control o revisión; la información que genera, el enfoque técnico, ambiental, económico y social. La mayoría de éstas son usadas empresarialmente para el logro de productos sostenibles (Pré Consultans, 2007). Algunas de las más importantes se detallan a continuación.

2.2.1. Análisis y Evaluación del Riesgo Ambiental

Los análisis de riesgos medioambientales están enfocados en la responsabilidad medioambiental inherente a la actividad que pretende desarrollar cualquier industria. Este análisis debe ser realizado por los operadores o un tercero contratado por la industria según el MITECO.

Existe normativa aplicable a este análisis, siguiendo el esquema que establece la norma UNE 150008:2008: Análisis y evaluación del riesgo ambiental.

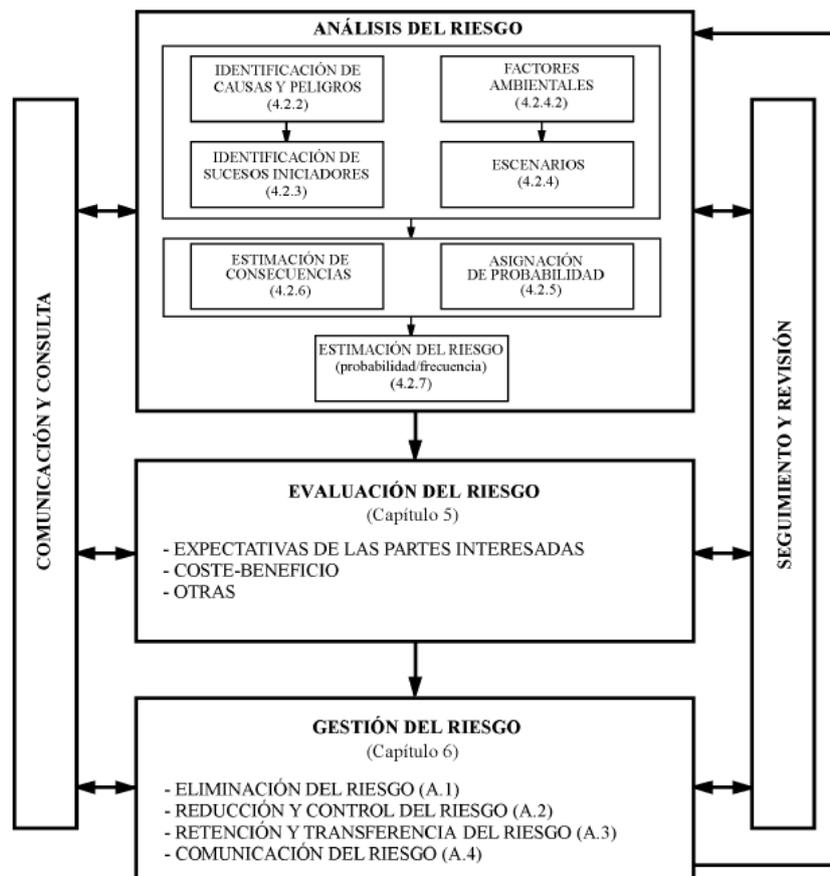


Figura 5. Proceso iterativo para identificar, evaluar y gestionar el riesgo ambiental. ISO 15008:2008.

Como cualquier análisis, se debe considerar un análisis preliminar y alcance del estudio, en virtud de los problemas u oportunidades que desencadenaron el análisis del riesgo, las decisiones a abordar y los grupos de interés afectados por las decisiones.

En la Figura 6 se observa que el análisis de riesgos se compone de dos partes:

- Escenarios causales.
- Escenarios de consecuencias.

Las partes se entienden como la vinculación en el espacio-tiempo de causas por un lado y consecuencias por otro, que dan lugar a un accidente concreto con un daño asociado.

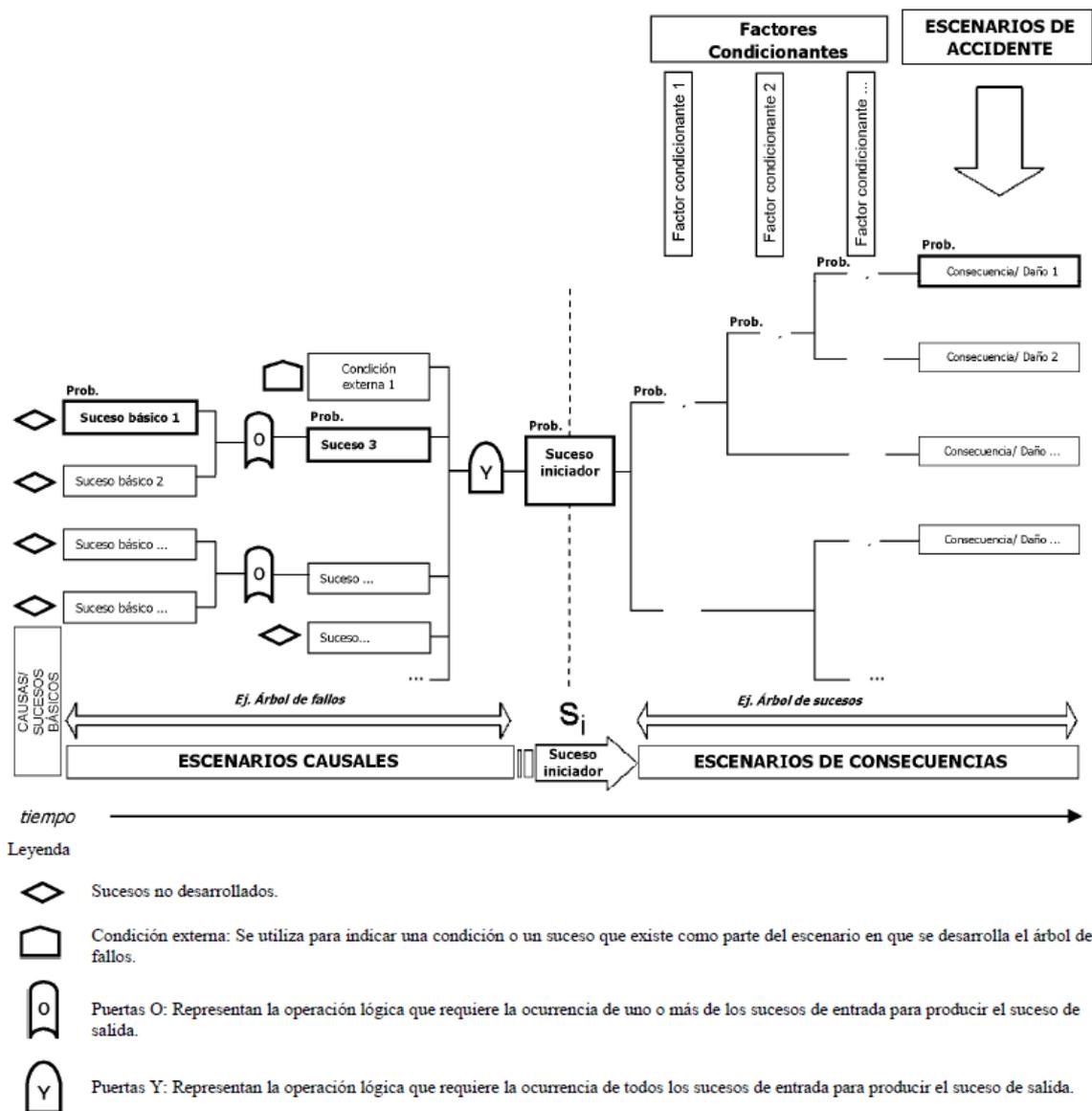


Figura 6. Esquema general de la metodología para el análisis de riesgos. ISO 15008:2008.

A través del proceso iterativo de recogida de información y factores ambientales, se debe asignar una probabilidad del escenario de accidente, estimar las consecuencias asociadas al escenario del accidente y estimar el riesgo.

La evaluación del proceso a raíz de los resultados del análisis y los criterios no aplicados que actúan como condicionantes, la organización debe emitir un juicio acerca de la tolerabilidad del riesgo y por tanto de su aceptabilidad. Es un proceso de reflexión y análisis que implica necesariamente la toma de decisiones al respecto.

Entre los criterios que pueden formar parte del proceso de evaluación se encuentran:

- Los factores de tipo social y particularmente los de carácter legal expresados tanto en datos actuales como en tendencias.
- La propia estrategia de negocio de la compañía, así como sus valores y conducta expresados en misión, visión y otros códigos, políticas o manuales.
- Las necesidades o expectativas de las partes interesadas previamente seleccionadas en el alcance del análisis de riesgos.
- Los aspectos económicos y financieros, tanto del global de la organización, como los particularmente derivados de la reducción del riesgo a aplicar.
- La disponibilidad o madurez de la tecnología o del equipamiento a utilizar para reducir o eliminar el riesgo.

2.2.2. ACV

El ACV está enfocado al ciclo de vida completo de un producto o sistema, desde la extracción de la materia prima hasta el final de su vida útil. Concretamente, las etapas que aborda el ACV son la extracción/adquisición de materias primas, el procesamiento del material para su adecuación y producción, el transporte y distribución entre proveedores, el uso del producto o sistema, y el fin de vida (disposición del residuo, reciclaje, reutilización, revalorización, etc.).

Según las normativas ISO 14040 Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Principios y marco de referencia, e ISO 14044 Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Requisitos y directrices, se definen unos principios y marco de referencia para la realización de un ACV.

En el marco se incluyen: el objetivo y alcance del estudio, los límites del sistema, el análisis del inventario, la evaluación del impacto y la interpretación de resultados.

- Definición del objetivo y alcance.

Deben estar claramente definidos y ser coherentes para asegurar la amplitud, profundidad y nivel de detalle del estudio, para alcanzar los objetivos establecidos.

El alcance incluye, entre las características más esenciales, la unidad funcional, los límites del sistema, los requisitos de calidad de los datos, las suposiciones y las limitaciones.

- Unidad funcional.

La unidad funcional define la cuantificación de las funciones identificadas. Debe ser coherente con el objetivo y alcance del estudio, proporciona una referencia a partir de la cual se normalizan los datos de entrada y salida del sistema, y debe estar claramente definida y ser medible.

- Requisitos de calidad de los datos.

Los requisitos de calidad de los datos especifican las características de los datos necesarios para el estudio. Su descripción es importante para comprender la fiabilidad y transferibilidad de los resultados del estudio e interpretar correctamente los resultados del mismo.

- Suposiciones y limitaciones.

La acotación del estudio a unos límites del sistema deriva en definir suposiciones acordes al alcance y objetivo, ya que no se podría englobar todo el sistema.

- Límites del sistema.

Los límites del sistema demarcan el conjunto de procesos unitarios que incorpora el ACV. Se debe identificar y explicar los criterios utilizados para establecer dichos límites. Las decisiones se deben tomar considerando los procesos unitarios a incluir en el estudio y el nivel de detalle al cual se debe estudiar estos procesos unitarios.

- Análisis del inventario

La definición del objetivo y el alcance de un estudio proporciona el plan inicial para realizar la fase del inventario del ciclo de vida de un ACV.

El proceso es iterativo, conforme se va avanzando en la recopilación de datos y se profundiza en el sistema, se puede encontrar con nuevas limitaciones que requieran cambios en la recopilación de datos.

En la Figura 7 se describen los pasos para el análisis del inventario del ciclo de vida.

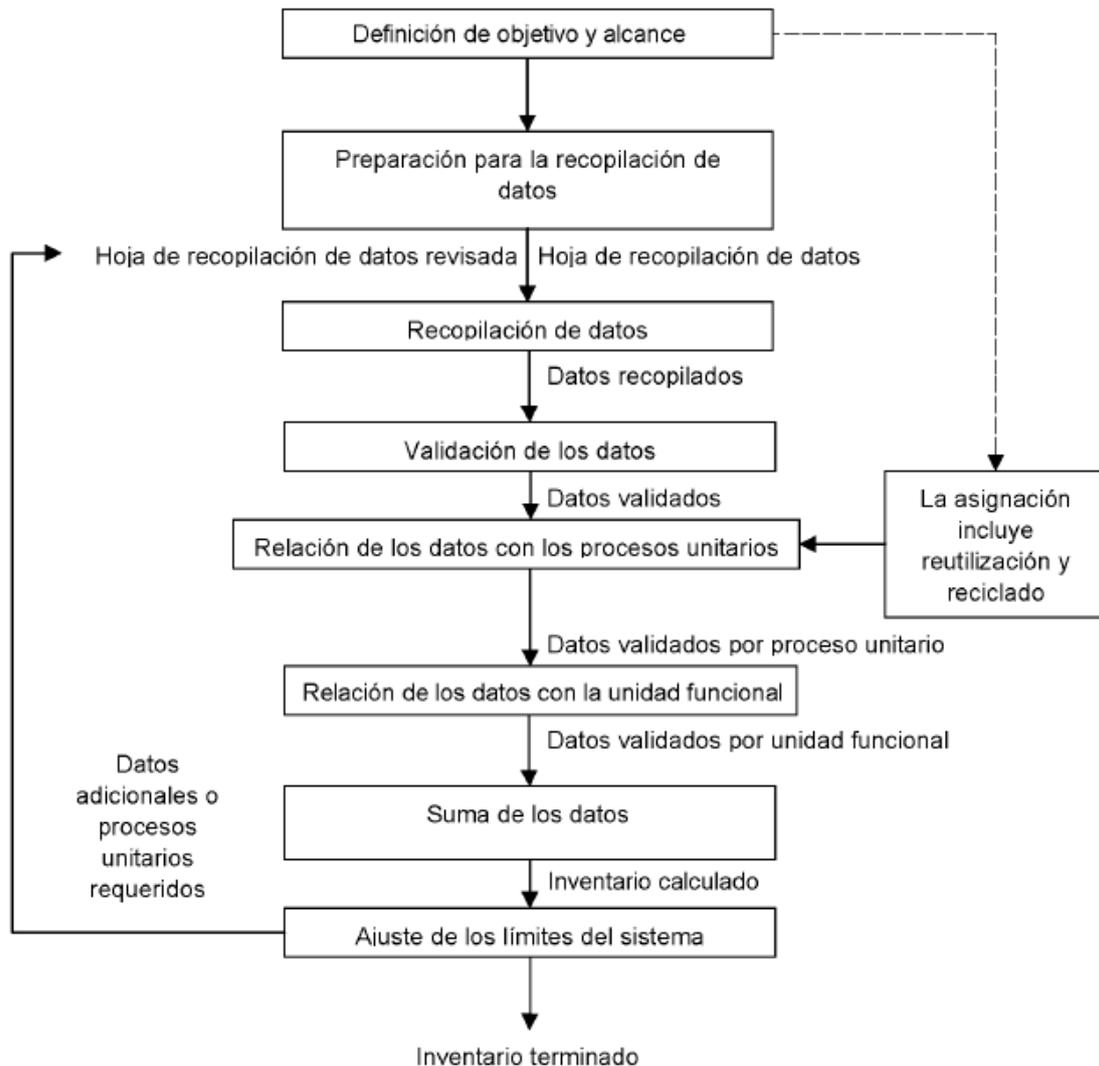


Figura 7. Procedimientos simplificados para el análisis del inventario. ISO 14044:2006.

- Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV).

A través de los resultados del inventario se evalúan cuantitativamente los impactos ambientales y se identifican aquellos más significativos, para posteriormente actuar sobre ellos. En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicos, así como con los indicadores que permiten entender los impactos asociados a cada categoría. La fase de EICV también proporciona información para la fase de interpretación del ciclo de vida.

La evaluación del impacto puede incluir un proceso iterativo de revisión del objetivo y del alcance del estudio de ACV para determinar si se han cumplido los objetivos, o para modificar el objetivo y el alcance si la evaluación indica que no se pueden alcanzar.

En la Figura 8 se definen los elementos de la fase EICV.

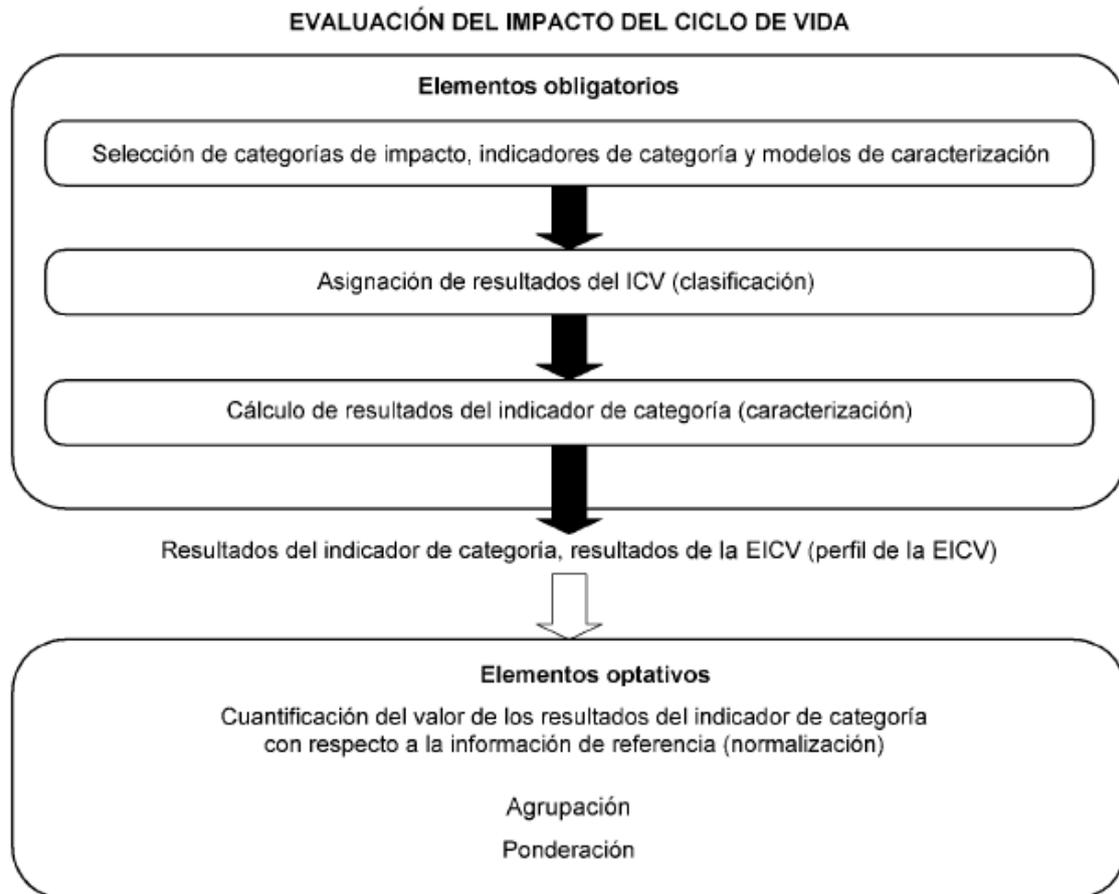


Figura 8. Elementos de la fase EICV. ISO 14040:2006.

- Interpretación de resultados del ciclo de vida.

La fase de interpretación proporciona resultados coherentes con el objetivo y alcance anteriormente definidos que den lugar a conclusiones. La interpretación debe incluir una evaluación y verificación del análisis de sensibilidad de las entradas, salidas y elecciones metodológicas significativas para entender la incertidumbre de los resultados.

La interpretación del ciclo de vida intenta ofrecer una lectura comprensible, completa y coherente de la presentación de resultados de un ACV, de acuerdo con la definición del objetivo y el alcance del estudio.

2.2.3. Método Ad – Hoc

Método Ad – Hoc, también denominado “panel de expertos”, es una metodología que se basa en la consulta sistemática a expertos para identificar los impactos ambientales que puede provocar un producto, sistema o incluso acciones, determina las medidas correctivas a aplicar cuando el impacto se haya producido o medidas preventivas para prever un suceso, y se asesora sobre la implementación de procedimientos de control y seguimiento.

Los equipos de expertos deben estar bien ligados al ámbito de actuación de la industria, con gran conocimiento técnico y experiencia en el sector. Por tanto, la principal virtud de esta metodología representa a su vez una de sus principales desventajas, debido a la dificultad de establecer en ocasiones buenos paneles de expertos representativos para analizar todos los factores ambientales. Entre sus ventajas se cuenta con que es una metodología rápida y fácil de llevar a la práctica, permitiendo adaptarse a las necesidades del estudio o análisis, capaz de integrarse a otras metodologías, por ejemplo, las mencionadas anteriormente.

2.2.4. Matriz de Leopold

La matriz de Leopold es un instrumento cualitativo de evaluación de impacto ambiental, considerado como un método indirecto, donde se califican las interacciones que existen entre las actividades del proyecto o estudio y el medio ambiente. Su ámbito de aplicación se sitúa en proyectos o fases que estén en construcción, como podría ser la construcción de la infraestructura necesaria para el procesamiento de los alimentos a nivel industrial.

Se presenta como una matriz donde en las columnas se definen las acciones o actividades del proyecto, y en las filas los factores ambientales o componentes del medio ambiente. La matriz está limitada a 100 (columnas) acciones causantes de impacto al medio ambiente y 88 (filas) características y condiciones ambientales, donde existen un total de 8800 posibles interacciones (Leopold., 1971).

La forma más eficaz es identificar las acciones más significativas. El cruce entre fila y columna se enumera con dos valores, uno de ellos indicando la magnitud relativa a los efectos (desde 1 hasta 10) y el otro la importancia (desde 1 hasta 10), considerando un signo negativo (-) un impacto negativo y un signo positivo (+) un impacto positivo. La ponderación es subjetiva y se debería hacer con la participación de todo el equipo de especialistas (Espinoza., 2006). A continuación, se evalúan los resultados y un alto o bajo valor indica el grado del impacto ambiental.

2.3. Aplicación de ACV a procesos de Pasteurización

La metodología de ACV se ha aplicado ampliamente para la evaluación medioambiental de la industria de la alimentación, ayudando a la propuesta de alternativas para la revalorización de subproductos y residuos en toda la cadena de valor.

González et al. (2006) aplicaron un ACV a las bebidas gaseosas combinando esta metodología con la metodología Pinch, evaluando resultados del consumo de agua. Medina (2006) utilizó la metodología ACV para dar una visión de los costes y consumos de energía, y de las cargas asociadas a la producción de tomate de invernadero en la Sabana de Bogotá (Colombia).

Kasmaprapruet et al. (2009) realizaron un estudio en Tailandia aplicando un ACV a la producción de arroz desde la etapa agrícola, evaluando efecto invernadero, acidificación

de los suelos y eutrofización. Karlsdottir et al. (2010) estudiaron las emisiones de CO₂, su efecto invernadero e indicadores de consumos energéticos, teniendo en cuenta el impacto de las tecnologías, los costes, la disponibilidad e impactos sociales. González y Quesada. (2011) realizó una evaluación del desarrollo sostenible en Cuba para la producción de arroz, donde sugiere comparaciones a través del ACV para cada región.

Algunos estudios se han realizado en la industria azucarera cubana (Contreras et al., 2009), sobre el zumo de frutas ecológicas, (Márquez., 2007), evaluación de impactos comparando dos alimentos mediante el ACV (Cruz., 2009), al arroz en la fase agrícola, teniendo en cuenta el uso de los recursos suelo, agua y productos químicos e impactos al ecosistema. Daesoo et al. (2013) estudiaron la sostenibilidad del queso mozzarella, enfocando en los impactos al ecosistema y salud humana, proponiendo alternativas para reducir los consumos de agua y combustibles fósiles, también otros estudios del mismo autor revelan evaluaciones del ciclo de vida del queso y el suero en Estados Unidos. Muller et al. (2014) estimaron los impactos ambientales de la producción artesanal del queso y sus procesos a nivel industrial, proponiendo mejoras y alternativas.

Canellada. (2017) realizó un análisis del ciclo de vida y huella de carbono de una quesería tradicional, determinando cuantitativamente los impactos ambientales derivados de la actividad industrial alimentaria, también propone alternativas a los procesos productivos para que sean más sostenibles. Serrano 2019 analiza y verifica mediante ACV la producción de chorizo artesanal, considerando la química verde como alternativa en la industria, ya que se está convirtiendo en una necesidad para evaluar y gestionar los productos, y procesos en la industria alimentaria, además de contribuir a una sociedad más sostenible (Lozano 2018). Skunca et al. (2018) estudiaron la cadena de valor de la carne de pollo, evaluando el ciclo de vida y desempeño ambiental de los procesos industriales.

González-Velandia et al. (2020) evaluaron los impactos ambientales de la producción agroecológica de huevos empleando un análisis del ciclo de vida, mostrando diferencias entre los sistemas convencionales de producción y los orgánicos (30% menos de impacto).

Siguiendo las distintas etapas expuestas en la metodología del análisis de ciclo de vida, a continuación, se presentan los principales métodos y resultados seguidos en el estado del arte con la finalidad de establecer un análisis estadístico que permita guiar el estudio en un marco que facilite la comparación de resultados.

2.3.1. Objetivo y Alcance

Aganovic et al. (2017), en su estudio sobre alternativas para pasteurización del jugo de tomate, evaluaron el balance energético y el ACV de tecnologías convencionales térmicas y alternativas, como PEF y HHP para la conservación del zumo de tomate. También realizó una comparación entre tecnologías a un nivel equivalente de inactivación microbiana considerando la misma capacidad de producción a escala piloto utilizando equipos a escala industrial.

Por otro lado, Pardo y Zufía. (2012) elaboraron un estudio, de una forma más compacta, sobre los impactos ambientales de algunas tecnologías convencionales y otras alternativas de conservación de alimentos, que han sido evaluados a través de la metodología ACV con el fin de brindar criterios ambientales a la hora de seleccionar métodos de conservación de alimentos, como una forma de desarrollar productos alimenticios más eficientes y sostenibles a lo largo de todo su ciclo de vida. Se seleccionaron cuatro técnicas térmicas y no térmicas:

- Pasteurización en autoclave (AC)
- Microondas (MW)
- Alta Presión Hidrostática (HHP)
- Envasado en Atmósfera Modificada (MAP)

Se comparan los aspectos ambientales e impactos asociados con los diferentes métodos de conservación de alimentos. También se identifican las cuestiones clave del ciclo de vida de todos los procesos evaluados y la tecnología como una forma de mejorar potencialmente su entorno de rendimiento. La perspectiva de ACV en el estudio de Pardo y Zufía. (2012) es la etapa de preservación, cumpliendo con los requisitos aplicables al proceso y asegurar una correcta seguridad alimentaria, junto con el aumento de la vida útil de los productos.

2.3.2. Unidad Funcional

La UF es la base de referencia para aplicar una comparación normalizada de los datos entre los diferentes tratamientos de pasteurización. Por un lado, según Aganovic et al. (2017) como las diferentes tecnologías operan de distinto modo, el uso de una unidad funcional en masa cubriría las necesidades de los límites del sistema, definiéndose la UF como 1 kg de zumo pasteurizado. Por otro lado, según Pardo y Zufía. (2012) el tratamiento de pasteurización se le realizaría a 1 kg de producto (200 g de pescado precocinado y vegetales), consiguiendo una vida útil óptima. Asimismo, generalmente en los análisis del ciclo de vida de la literatura, coinciden con la unidad de masa como unidad funcional, 1 kg de producto producido y pasteurizado (Skunca et al., 2018), que se ajusta dentro del ámbito de estudio del zumo de tomate.

2.3.3. Calidad de los Datos

La calidad de los datos de campo es verificable mediante cuestionarios, informes y vistas técnicas, como datos primarios de los procesos de conservación de alimentos.

Una alternativa son los datos secundarios, optando por una comunicación vía e-mail con proveedores y técnicos especializados en los procesos de tratamiento.

Finalmente, el resto de información complementaria (datos de fondo) se obtiene a través de bases de datos públicas o privadas, tales como Ecoinvent, informes sectoriales y literatura científica.

La obtención de resultados del estudio de ACV se consolida utilizando una calculadora de huella ambiental o un software específico profesional, tales como Umberto, TEAM, Gabi, Open LCA, SimaPro, etc. Este último es uno de los paquetes más compactos, competentes y de mayor implementación en la investigación científica. A dicho software se aplican las bases de datos adaptados (Ecoinvent, etc.).

En la literatura de ACV de la industria alimentaria, los datos incluidos en estudios tales como el de Aganovic et al. (2017) se recopilaron experimentalmente, incluyendo las condiciones de procesamiento seleccionadas, el consumo de energía, el uso del agua, los agentes de limpieza y el mantenimiento. La metodología de ACV implementada en este estudio se basó en el método IMPACT 2002+, que es una combinación y mejora de los métodos indicador 99 y CML 2001, permitiendo el análisis de resultados de acuerdo con las principales categorías de impacto a punto medio (*midpoint*) (por ejemplo, calentamiento global, ocupación de la tierra, uso de energía no renovable), y aplicado en el software SimaPro con adaptación de los procesos de la base de datos Ecoinvent 3.2.

Pardo y Zufía. (2012) obtuvieron datos de dos fuentes principales; datos de campo de energía, químicos y agua durante los procesos en la industria, y datos de fondo a partir de la literatura y complementarios a través de la base de datos Ecoinvent 2.0. Mediante el software SimaPro, se siguió la metodología ReCiPe *midpoint* para la evaluación de impacto, siendo el método más utilizado globalmente y con resultados más fiables. Asimismo, se siguió una lista predeterminada de categorías de impacto más relevantes; CG, AT, EAD, EM y AOE.

Skunca et al. (2018) elaboraron cuestionarios para recopilar los datos necesarios para los cálculos. También realizó visitas *in situ* a la industria avícola, para verificar la coherencia de las unidades con los datos, la mayoría de muestra se recogió en Belgrado (Serbia) por ser el mercado con más desarrollo. Incluso la realización de entrevistas personales ayudó a completar los datos y reducir las limitaciones en la investigación. Los potenciales de impacto los calcula con el método IMPACT 2002+ (V2.12). Como base de datos utiliza Ecoinvent v3 y el software SimaPro 8.2.3 (Consultants, 2016). Sigue los estándares ISO 14040 y 14044. Las categorías de impacto más relevantes a investigar son CG, DAE, ACO, PA y PE.

2.3.4. Límites del Sistema

La identificación de los límites del sistema engloba el objetivo y alcance definidos; en un primer acercamiento al sistema, se podría revisar la etapa de procesamiento de la producción de jugo de tomate ("*Gate-to-gate*") según Aganovic et al. (2017), y en un segundo plano se ampliarían los límites a la etapa de producción agrícola y tratamiento de residuos durante la preparación y el procesamiento del jugo ("*Cradle-to-gate*"). De acuerdo con Pardo y Zufía. (2012), que también definieron unos límites del sistema de la cuna a la puerta, se llega a la conclusión de que es la mejor opción, ya que la fase de

fin de vida es compleja de tratar, desconociendo los residuos o subproductos cogenerados durante el proceso de pasteurización industrial. El enfoque de Skunca et al. (2018) planteó una perspectiva de la cuna a la tumba (“cradle to grave”), teniendo en cuenta la gestión de los residuos generados para su posterior tratamiento o gestión.



Figura 9. IHOBE, “Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto”, 2009.

2.3.5. Análisis del Inventario

Conforme Aganovic et al. (2017), el inventario de ACV para las etapas de procesamiento, se basa en condiciones lo más similares posible, es decir, con las mismas materias primas, condiciones de operación (lavado, tamizado, etc), el mismo embalaje y técnicas de embotellado. Los subproductos o residuos procedentes de los procesos se trataron aplicando compostaje en el campo, para en un futuro poder revalorizarlo como fertilizante (no se aplica dicho fertilizante compostado en el proceso de cultivo).

De acuerdo con Pardo y Zufía. (2012), para estimar los datos de entrada del inventario, se realizó un breve resumen de los procesos principales de producción, las etapas de producción y procesamiento son las principales, tales datos se observan en la Tabla 1.

En cuanto a las asignaciones, se tomaron las siguientes asunciones:

- En la etapa de fabricación de las infraestructuras y maquinaria, la demanda energética y los materiales se estimaron de acuerdo con el peso de la maquinaria necesaria para cada tecnología de conservación y composición de sus principales componentes.
- Se realizó una asignación masiva en aquellas fases relacionadas con el equipamiento (extracción de materiales, fabricación, transporte, final de vida),

por lo que el impacto ambiental de estas etapas se dividió entre la suma total de los alimentos potencialmente tratados en la vida útil esperada del equipo.

- La electricidad se obtuvo procedente del mix eléctrico medio de la red español.
- Para la extracción de minerales se inventariaron los procesos de fabricación de acero y metales con datos fácilmente disponibles de la base de datos Ecoinvent 2.0.
- La bandeja y el film a base de PP se consideraron materiales de embalaje.
- El EVOH se incluye para proporcionar las propiedades de barrera de gas en el caso de los envases en atmósfera modificada. Los datos del copolímero EVA se utilizaron como aproximación para EVOH de acuerdo con Humbert et al. (2009).
- En el proceso de AC, el tratamiento térmico se estimó a una temperatura de 90°C durante 35 min para la conservación del producto. Se asumió que el vapor inyectado era el medio de calor, producido a partir de gas natural (50%) y fuel oil (50%), según referencias de la media de producción de vapor en la industria de productos listos para el consumo (EC., 2006). Para la etapa de preenfriamiento se ha considerado una torre de enfriamiento, un sistema de refrigeración de circuito cerrado. Mientras que se tomó un congelador específico como unidad de enfriamiento final. Se contabilizaron la evaporación, junto con el consumo de peróxido de hidrógeno, utilizado como desinfectante de las aguas de los procesos.
- Se asumió un tratamiento térmico similar para la pasteurización por MW que, para AC, aunque en un tercio menos de tiempo se consideró que alcanzaba las mismas condiciones operativas (35 min, 90°C). El consumo de electricidad se estimó asumiendo una ratio promedio 0.32 kWh/kg. Se contabilizó el mismo esquema de refrigeración para MW como para AC.
- Para HHP, un tratamiento de presurización en el que se estimaron unas condiciones de operación de 500 MPa durante 8 min para el estudio, de acuerdo con recomendaciones de proveedores y revisión de la literatura. El consumo de electricidad se consideró para la etapa de arranque y continuo con un rendimiento de 0,2 kWh/kg. Se contabilizaron las necesidades de agua para el sistema de refrigeración (1,4 l/kg) y llenado de recipiente a presión (0,5 l / kg).
- En el proceso de envasado MAP, se consideró una mezcla de gas estándar para uso alimentario de CO₂/N₂ (80:20) y una ratio gas/producto de 1,5 según los datos del fabricante. La composición asumida de la multicapa coextruida del material de envasado (PP/EVOH/PP) fue de PP (90%)/EVOH (10%). El proceso de coextrusión se tomó de la base de datos Ecoinvent 2.0.

De igual modo, Skunca et al. (2018) intentan agrupar los datos del inventario en las condiciones más equivalentes, los subsistemas en los que se divide su estudio comparten entradas y consumos afines, como el consumo de agua y electricidad en

todos los procesos. Luego en el cultivo de la materia prima, se necesitan aportes complementarios de nutrientes. Se distinguen consumos eléctricos y de combustibles fósiles en unos y otros subprocesos dependiendo de las necesidades. También hace mención a las necesidades de embalaje y las salidas de sistemas como residuos o aguas contaminadas.

2.3.6. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

La EICV se debe planificar para lograr el objetivo y alcance del estudio del ACV. Esta fase está condicionada por las fases anteriores, teniendo en cuenta posibles omisiones e incertidumbre. Se incluye la recopilación de los resultados de indicadores para las diferentes categorías de impacto, que en conjunto representan el perfil de la evaluación para el sistema o producto.

A continuación, se describen las categorías de impacto del método global ReCiPe (2016):

- Calentamiento global (CG): El factor de caracterización del cambio climático es el potencial de calentamiento global, según el informe del IPCC de 2013. Las retroalimentaciones climáticas de carbono se incluyen para los GEI distintos del CO₂ en la perspectiva del jerarquismo. La unidad es años/kg de CO₂ eq.
- Agotamiento del ozono estratosférico (AOE): El factor de caracterización del agotamiento de la capa de ozono explica la destrucción de la capa de ozono estratosférica por emisiones antropogénicas de sustancias que agotan la capa de ozono. La unidad es año/kg de CFC-11 eq.
- Radiación ionizante (RI): El factor de caracterización de la radiación ionizante explica el nivel de exposición de la población mundial. La unidad es año/kBq de cobalto-60 eq al aire.
- Formación de ozono, Salud humana (FOSM): El factor de caracterización se determina a partir del cambio en la tasa de ingesta de ozono debido al cambio en la emisión de precursores (NO_x y COVNM). La unidad de potencial de formación de ozono para la salud humana es años/kg de NO_x eq.
- Formación de partículas finas (FPF): El factor de caracterización de la formación de partículas es la fracción de entrada de PM_{2.5}. La unidad es año/kg de PM_{2.5} eq.
- Formación de ozono, ecosistemas terrestres (FOET): El factor de caracterización se determina a partir del cambio en la tasa de ingesta de ozono debido al cambio en la emisión de precursores (NO_x y COVNM). La unidad de potencial de formación de ozono del ecosistema es años/kg de NO_x eq.
- Acidificación terrestre (AT): El factor de caracterización para la acidificación terrestre es el potencial de acidificación (AP) derivado utilizando el factor de

destino promedio mundial ponderado por emisiones de SO₂. La unidad es año/kg de SO₂ eq.

- Eutrofización de agua dulce (EAD): El factor de caracterización de la eutrofización del agua dulce explica la persistencia ambiental (destino) de la emisión de nutrientes que contienen P. La unidad es año/kg P eq de agua dulce.
- Eutrofización marina (EM): El factor de caracterización de la eutrofización marina explica la persistencia ambiental (destino) de la emisión de nutrientes que contienen nitrógeno. La unidad es año/kg N eq marinos.
- Ecotoxicidad terrestre (ET) - Ecotoxicidad del agua dulce (EAD) - Ecotoxicidad marina (EM) - Toxicidad cancerígena humana (TCH) - Toxicidad humana no cancerígena (THNC): El factor de caracterización de la toxicidad humana y la ecotoxicidad explica la persistencia ambiental (destino) y la acumulación en la cadena alimentaria humana (exposición) y la toxicidad (efecto) de una sustancia química. La unidad es año/kg 1,4 diclorobenceno (1,4-DCB) emitido.
- Uso del suelo (US): La cantidad de tierra transformada u ocupada durante un tiempo determinado. La unidad es m²·año.
- Escasez de recursos minerales (ERM): El factor de caracterización de la escasez de recursos minerales es el potencial excedente de mineral. La unidad es kg de cobre (Cu) eq.
- Escasez de recursos fósiles (ERF): El factor de caracterización de la escasez de recursos fósiles es el potencial de combustibles fósiles, basado en el mayor poder calorífico. La unidad es kg de aceite eq.
- Consumo de agua (CA): El factor para el uso del agua es la cantidad de consumo de agua dulce. La unidad es m³ de agua consumida. La implementación actual incluye factores de caracterización regionalizados en la versión de punto final del método.

Según la literatura, los diferentes métodos de evaluación de impacto de ACV se desarrollan a un nivel investigador y profesional con el software SimaPro, y el método ReCiPe principalmente. Entre todas las categorías de impacto evaluadas en literatura, las más importantes son:

- Calentamiento global (CG) (kg CO₂ eq)
- Agotamiento del ozono estratosférico (AOE) (kg CFC-11 eq)
- Eutrofización de agua dulce (EAD) (kg P eq)
- Eutrofización marina (EM) (kg N eq)
- Acidificación terrestre (AT) (kg SO₂ eq)
- Uso del suelo (US) (m²·año eq)
- Consumo de Agua (CA) (m³)

Todas ellas calculadas a través de la metodología ReCiPe de punto medio y base de datos de Ecoinvent. También tienen en cuenta los consumos energéticos como una categoría de impacto, aunque no se refleja en la metodología.

El proceso de evaluación del impacto implica asociar los datos con las categorías de impacto y los indicadores para entender los impactos ambientales. La selección de indicadores de desempeño ambiental fue la siguiente:

- Condiciones de procesamiento
- Consumos energéticos
- Consumos de agua
- Productos de limpieza
- Mantenimiento

2.3.7. Interpretación de Resultados y Conclusiones

El estudio de Aganovic et al. (2017), centrándose en el proceso de pasteurización HHP y AC, identificó mayores impactos en las principales categorías (ReCiPe, 2010):

- Alta Presión Hidrostática (HHP):
 - Calentamiento Global: 1.95 kg CO₂ eq.
 - Uso del suelo: 0.50 m²
 - Consumo de energía no renovable: 7.70 kWh
- Térmico Convencional en Autoclave (AC):
 - Calentamiento Global: 1.84 kg CO₂ eq.
 - Uso del suelo: 0.50 m²
 - Consumo de energía no renovable: 7.19 kWh

Los mayores impactos relacionados con el jugo de tomate se asociaron con el uso de energía de diversas fuentes (electricidad y calor) para la producción de jugo de tomate. Si se selecciona un mix eléctrico europeo con gas natural, se reducirían en un 30% los consumos energéticos (Pardo y Zufía., 2012).

Por lo tanto, Aganovic et al. (2017) asumieron que los cambios en la combinación energética de la electricidad o los tipos de combustibles utilizados para el aumento de temperatura durante los procesos podrían cambiar los resultados generales del estudio. Esto se confirmó para el cambio de energía de calefacción de la mezcla europea a gas natural (ambos procesos de fondo de la base de datos ecoinvent 3.2). El uso de gas

natural tuvo un impacto menor en alrededor del 30%, en comparación con la combinación de fuentes de energía (incluye el uso de carbón). De manera similar, el cambio de las distancias de transporte (asumiendo que el procesamiento tuvo lugar en una distancia menor a 100 km) no cambió los resultados de manera considerable.

Según Aganovic et al. (2017), el cultivo de tomates en el campo (reduciendo el consumo de energía en un 90%) permitió disminuir los impactos ambientales generales del jugo de tomate en casi un 50%. Otro escenario alternativo con impacto potencial fue el uso de botellas de polietileno de alta densidad (HDPE). El uso de botellas de HDPE del mismo peso permitió disminuir el impacto ambiental global en un 10%. Se logró un efecto similar con el uso de botellas de PP. Por lo tanto, el mejor escenario de producción de jugo de tomate se basaría en el uso de tomates cultivados en el campo y botellas de HDPE o PP. Daría como resultado una disminución del 60% del impacto ambiental de la producción de jugo de tomate de referencia.

En términos de consumo de energía para una capacidad de producción de 120l/h, la mayor absorción de energía específica se registró para HHP, lo que resultó en un consumo de energía de 0,20 kWh/l de jugo, seguido por el térmico con 0.04 kWh/l de jugo. En cuanto al impacto ambiental, se observaron diferencias esperadas entre las tecnologías en función de las diferencias en el consumo de energía. Aunque las diferencias de la etapa de procesamiento se asignaron al uso de energía, el mayor impacto ambiental se asoció con la producción de botellas de PET de 250 ml (85%). A partir del análisis de sensibilidad se identificaron diferentes estrategias para disminuir el impacto. Están asociadas con la producción de materia prima (tomates de campo), la disminución de la cantidad de residuos (selección del tipo de sandía) y la selección de envases relevantes (HDPE o PET).

En el estudio de Pardo y Zufía. (2012), las técnicas emergentes mostraron impactos ambientales reducidos en términos de demanda de energía y emisiones de CO₂ en relación con AC. Además, se observaron menores requisitos de agua para las tecnologías no térmicas (MAP, HHP) en comparación con los procesos térmicos equivalentes.

Se descubrió que MAP era la opción más sostenible cuando se requiere un período de vida útil inferior a 30 días. Se analizaron las fuentes de impacto más significativas del ciclo de vida de cada tecnología y se identificaron varias mejoras potenciales, desde un punto de vista técnico y ambiental.

Globalmente, entre un 50 y 80% de los impactos ambientales es contribución del procesamiento de los alimentos, correspondientes a la pasteurización, enfriamiento y manufactura.

En el proceso convencional AC (Figura 10, superior-izquierda) se sigue la anterior tendencia. Por otro lado, el embalaje contribuye entre un 20% y un 50%, llegando hasta un 80% en la categoría de impacto de eutrofización.

Durante el proceso MW (Figura 10, superior-derecha) los impactos son similares al proceso convencional, siguiendo una tendencia parecida.

El proceso mediante HHP (Figura 10, inferior-izquierda) tiene una diferente tendencia en los impactos, aumentando la contribución del impacto durante el proceso de

fabricación de la maquinaria, debido a la extracción de minerales y la producción de acero, siendo compleja la tecnología de producción. También durante el enfriamiento en la conservación aumenta la contribución al impacto por consumo de agua, siendo el proceso industrial de pasteurización menos contribuyente.

En el proceso MAP (Figura 10, inferior-derecha), la mayor contribución al impacto total procede del embalaje, siendo la composición multicapa de bandeja y film los materiales principales.

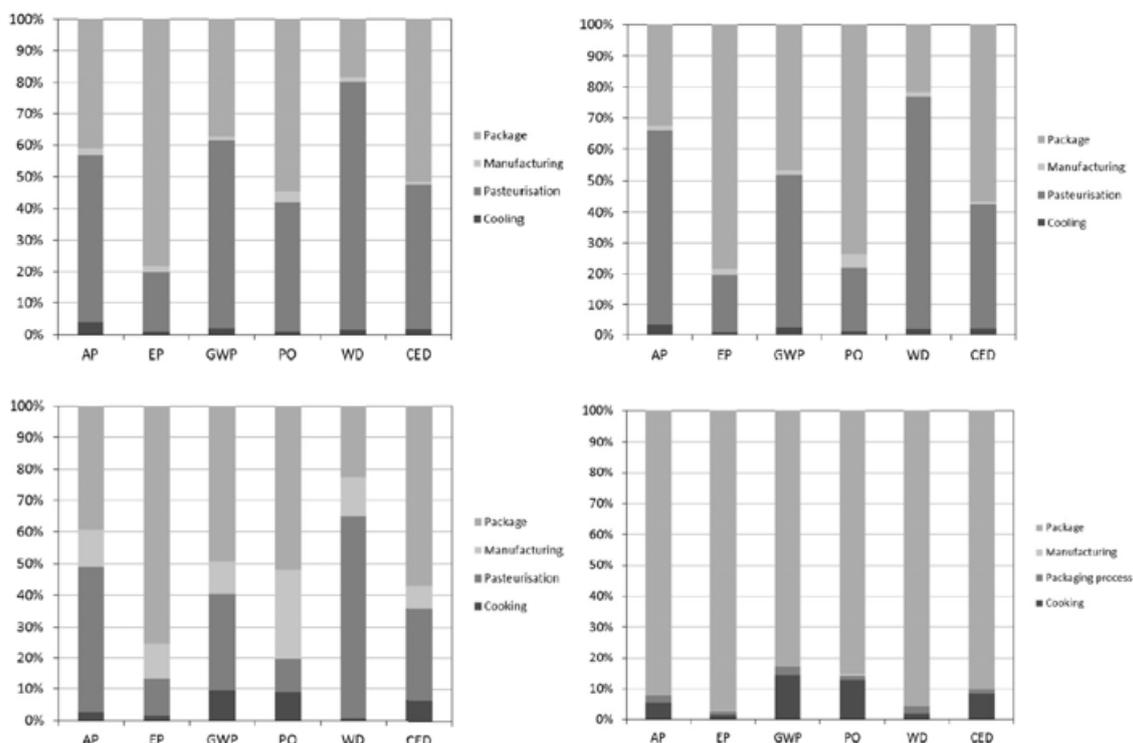


Figura 10. Impactos ambientales de los procesos de pasteurización. Pardo y Zufía., (2012).

De acuerdo con los resultados obtenidos con el método ReCiPe, MAP mostró los valores globales más bajos para la mayoría de las categorías de impacto consideradas cuando se compara con el resto de las técnicas analizadas (Pardo y Zufía., 2012). Si bien esto era de esperarse, debido principalmente a las bajísimas necesidades energéticas recogidas en los procesos de envasado e inyección de gas. La eficacia de este método varía significativamente según las propiedades de los alimentos (es decir, el pH) o los tratamientos térmicos suaves aplicados previamente (es decir, cocción, enfriamiento, etc.), por lo que estos factores deben tenerse en cuenta juntos al seleccionar el MAP como el método de conservación adecuado. Desde el punto de vista de la vida útil, las otras tecnologías estudiadas son comparables entre sí, descartando en un futuro el MAP porque los productos pasteurizados con este proceso tienen una vida útil muy corta.

En términos generales, los resultados revelan que las tecnologías alternativas pueden conducir a reducciones del impacto ambiental en comparación con los procesos térmicos tradicionales. Esto se atribuye a dos causas principales. En primer lugar, su capacidad para conservar los alimentos evitando sucesivas condiciones severas de calentamiento/enfriamiento, que contribuyen a una considerable minimización del

consumo de agua y calor. En segundo lugar, su fuente de consumo energético se basa en la electricidad, con un importante aporte de recursos renovables en lugar de la combustión directa de combustibles fósiles necesarios para la generación de calor en los tratamientos térmicos convencionales.

Según Pardo y Zufía. (2012) se normalizaron los resultados relacionados con las cargas ambientales y se volvieron más claros. El potencial de eutrofización, el potencial de calentamiento global y el potencial de acidificación resultaron ser las categorías de impacto ambiental más significativas afectadas dentro de los límites del estudio, lo que indica dónde deben orientarse los esfuerzos para reducir el impacto general de los métodos de conservación.

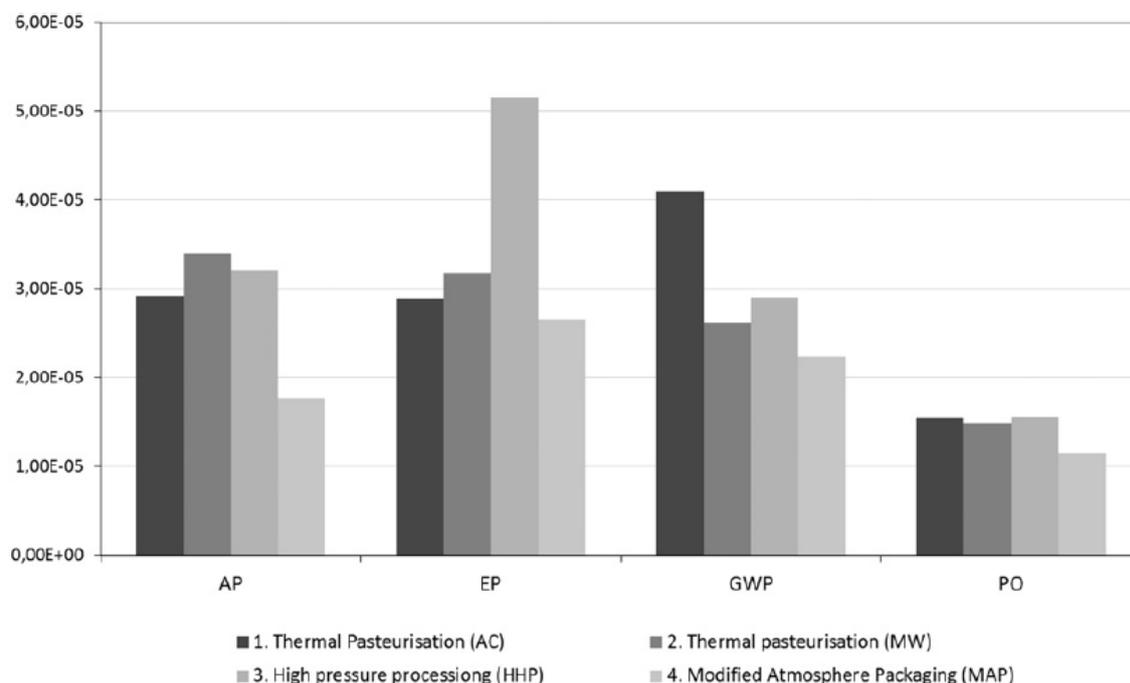


Figura 11. Normalización de resultados de impacto ambiental. ReCiPe. Pardo y Zufía. (2012).

La HHP tiene un impacto significativo en las categorías de calentamiento global y acidificación, atribuido al consumo de electricidad; y especialmente superior al resto en eutrofización, derivado de la etapa de extracción de materiales y disposición de los residuos del horno después de la producción de aleaciones de acero, lo que refleja la relevancia de la etapa de fabricación en esta tecnología.

Las tecnologías de pasteurización térmica (AC, MW) presentaron alta carga ambiental en casi todas las categorías de impacto, relacionadas directa o indirectamente con los procesos de combustión de combustibles fósiles involucrados en la fase de generación de energía térmica. Específicamente, la categoría de calentamiento global ha sido identificada como una de las categorías más afectadas por las cargas ambientales derivadas de los tratamientos de conservación de alimentos, siendo los resultados de AC aproximadamente un 20% mayor que las técnicas de pasteurización equivalentes (MW, HHP) debido a los requisitos importantes de calor y vapor de este proceso.

En el caso de agotamiento del agua, cabe señalar que los tratamientos no térmicos (MAP, HHP) tienen un menor consumo en comparación con las pasteurizaciones térmicas (AC, MW). Si bien los factores de impacto global y el filtro de normalización no reflejan la importancia de este aspecto, esta es una categoría muy sensible dentro del sector de procesamiento de alimentos, ya que las características regionales del clima pueden influir mucho en la importancia de la disponibilidad de recursos hídricos. Sin embargo, este punto puede reflejarse potencialmente en futuros enfoques de ACV regionalizados.

Analizando las fuentes de impacto identificadas a través del ciclo de vida de cada tecnología, y con base en un punto de vista técnico y ambiental, se pueden proponer algunas mejoras potenciales, como un intento de señalar varias oportunidades para reducir el impacto ambiental de los productos alimenticios procesados. En cuanto a las acciones de mejora encontradas en el estudio de Pardo y Zufía. (2012), se detallan las siguientes:

- El embalaje es un punto crítico para muchas de las categorías de impacto investigadas dentro del sistema de conservación de alimentos. Si bien el embalaje es un elemento esencial de casi todos los productos alimenticios, al aislar los alimentos de los factores que afectan la pérdida de calidad, como el oxígeno, la humedad y los microorganismos, representa una fuente importante de carga ambiental y desperdicio.
- Los circuitos de refrigeración de circuito cerrado, las oportunidades de intercambio de calor y/o las torres de enfriamiento de agua se han identificado como métodos eficientes para reducir tanto el consumo de energía como de agua en la etapa de pasteurización convencional de las industrias alimentarias.
- Con respecto a la pasteurización térmica por autoclave, donde el vapor es a menudo el medio de calentamiento directo o indirecto, el consumo de energía y agua puede minimizarse dependiendo de la tecnología de proceso considerada. El proceso de vapor saturado utiliza cantidades importantes de vapor para la ventilación, lo que conduce a importantes ineficiencias energéticas. Otro tipo de tecnologías de autoclave basadas en procesos de sobrepresión (es decir, autoclave por inmersión en agua, autoclave por aspersion de agua) permiten la combinación con un intercambiador de calor y una bomba para recircular tanto el agua de esterilización como de refrigeración, lo que permite la reutilización sin tratamiento químico para el siguiente proceso. También se puede agregar un recipiente de almacenamiento como depósito de agua caliente que se precalienta para el siguiente ciclo de pasteurización mediante la captura de agua estéril del proceso anterior.
- La optimización de la eficiencia en el uso de combustibles mediante la promoción de una adecuada planificación de la producción, el control avanzado de las calderas de vapor, el aislamiento de tuberías y equipos, y/o la sustitución de combustibles fósiles por fuentes renovables, como biomasa o biogás, son otras medidas de mejora a adoptar potencialmente en el futuro. mediante procesos térmicos convencionales con el fin de reducir su consumo energético y ser más respetuosos con el medio ambiente.

- Investigación en materiales complejos de alta tecnología y un diseño innovador que aún está en desarrollo, con potencial para ser mejorado teniendo en cuenta los aspectos ambientales. Los recientes avances de ingeniería han contribuido a la eficiencia de las operaciones de HHP. Los nuevos desarrollos mecánicos han permitido mejorar los diseños de intensificadores y los mecanismos de apertura/cierre conduciendo a tiempos de procesamiento más eficientes y mejores técnicas de pretensado que aumentan la resistencia a la fatiga de los recipientes bajo altas presiones (Norton y Sun., 2008). Otros avances pueden representar oportunidades para ahorrar energía y tiempo de proceso. Por ejemplo, el concepto Tandem de NC Hyperbaric, donde dos recipientes comparten el grupo de bombeo intensificador, y se ha demostrado que aumenta la productividad en aproximadamente un 15-20% en comparación con dos máquinas clásicas debido a la disminución del tiempo necesario para elevar la presión (Hernando-Sáiz et al., 2008).
- El calentamiento por MW también está recibiendo mucha atención de los investigadores en el desarrollo de nuevos procesos de pasteurización y esterilización para alimentos envasados. La utilización de modelos de simulación electromagnética junto con la información de las características de los alimentos está permitiendo ajustar y optimizar los aplicadores de microondas para lograr un calentamiento más homogéneo y reducir las pérdidas durante la energía, lo que lleva a técnicas de procesamiento más flexibles. Las discontinuidades en el sistema de transmisión de ondas al dispositivo final también implican pérdidas que afectan la eficiencia global. Esto se puede optimizar mediante simulación por ordenador, limitando las perturbaciones y aumentando el rendimiento energético.
- Los estudios más recientes sobre conservación de alimentos están examinando cómo diferentes métodos pueden funcionar sinérgicamente para reducir el nivel necesario de aditivos y/o procesamiento. El desafío para el futuro incluye el diseño de técnicas de inactivación e inhibición nuevas y mejoradas utilizando tratamientos combinados e interferencia de múltiples objetivos y estos enfoques innovadores pueden proporcionar un potencial importante para la reducción del impacto ambiental en las cadenas alimentarias futuras que será necesario considerar.

Tabla 1. Valores de caracterización comparativos para cada categoría de impacto. UF: 1 kg de producto pasteurizado. Pardo y Zufía. (2012).

Categorías de Impacto	Unidades	AC	MW	HHP	MAP
AT	g SO ₂	1.12	1.31	1.24	0.68
PE	g PO ₄	0.01	0.01	0.01	0.01
CG	g CO ₂ eq	397.30	254.20	281.80	217.30
OF	g C ₂ H ₄ eq	8.60	5.30	7.40	5.20
AA	l	3.30	2.50	2.50	0.90
DEA	J	410.40	263.30	292.90	224.20

3. Objetivos

El objetivo general del presente TFM es la generación y aplicación de un modelo ACV para determinar el impacto ambiental de los distintos procesos de pasteurización de productos alimentarios.

Para llevarlo a cabo, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Estudio del estado del arte de los procesos de tratamiento de pasteurización empleados en la industria alimentaria.
- Estudio del estado del arte de los estudios de ACV aplicados a procesos de tratamiento de pasteurización empleados en la industria alimentaria.
- Modelación de los impactos ambientales asociados a los procesos de tratamiento seleccionados mediante la aplicación de la metodología ACV de acuerdo a las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006.
- Recopilación de datos ajustables a los inventarios.
- Cálculo de impactos y evaluación de los resultados.

4. Metodología

El ACV llevado a cabo en este estudio sigue el marco estándar internacional de las normas ISO 14040 e ISO 14044, referentes a la gestión ambiental y ACV.

Los principios y procedimientos se basan en los antecedentes encontrados en la literatura de ACV de la industria alimentaria.

De acuerdo con las normas citadas, las principales fases del ACV son:

- Definición del Objetivo y Alcance
- Análisis de Inventario
- Evaluación de Impacto
- Interpretación de Resultados

4.1. Objetivo y Alcance

De acuerdo con el análisis bibliográfico realizado en el apartado anterior, la unidad funcional (UF) considerada para la comparación de los tratamientos es 1 kg de zumo de tomate pasteurizado.

La modelo de caracterización seleccionado es el ReCiPe 2016 v1.1 *midpoint*, versión jerarquista, que se basa en los principios políticos más comunes con respecto al marco de tiempo y otras cuestiones. Se ha escogido esta metodología porque se pretende ampliar el estudio a un nivel global, ya que las actuaciones y actividades de la industria alimentaria están encaminadas a lograr los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Por lo tanto, el ACV con ReCiPe sería más completo y compacto. La metodología se desarrolla a través del software SimaPro 9.1.1.1 y el uso de la base de datos de Ecoinvent 3.6, ya que se considera la base de datos más actualizada actualmente.

ReCiPe 2016 es una versión actualizada y ampliada de ReCiPe 2008. Al igual que su precursor, ReCiPe 2016 incluye categorías de impacto de punto medio (orientado a impactos) y de punto final (orientado a daños), disponibles para tres perspectivas diferentes (individualista (I), jerarquista (H), e igualitario (E)). Los factores de caracterización son representativos para la escala global, en lugar de la escala europea como se hizo en ReCiPe 2008. Por eso el método se movió de la categoría europea a global.

Las categorías de impacto seleccionadas son las que mejor se adaptan al estudio, ajustándose a los resultados que se pretenden obtener, las cuales definidas a través de la ISO 14040 como clases que representan asuntos ambientales de interés, que se les pueden asignar resultados del análisis del inventario del ciclo de vida.

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios se incluyen en el estudio del ACV, la elección de los elementos del sistema físico a modelar ha dependido del objetivo y el alcance del estudio.

El enfoque que se ha determinado según revisión bibliográfica y acorde al estudio es el cultivo y transporte (“*Cradle-to-gate*”) más el proceso de pasteurización (“*Gate-to-gate*”), donde se tendrán en cuenta las entradas y salidas de los límites del sistema, desde la extracción de materias primas hasta el producto final pasteurizado. Todo ello con más o menos limitaciones y asunciones, de acuerdo con la calidad de los datos investigados en la literatura.

En la Figura 12 se muestra el alcance del estudio que abarca las diferentes etapas a lo largo del ciclo de vida.



Figura 12. Límites del estudio dentro de toda la cadena de valor.

Con respecto a los procesos del procesamiento de alimentos (Figura 13), solo los pasos relacionados con el tratamiento de pasteurización participaron en el análisis, ya que el resto de los procesos son similares para cada tratamiento de pasteurización.

Los límites del estudio (*"Gate-to-gate"*) comienzan después del pretratamiento y primer enfriamiento, justo antes de realizar el tratamiento de pasteurización, y termina una vez conservado el producto, previamente a su distribución. Además, se han añadido para adaptar las técnicas no térmicas (HHP, MAP) al estudio comparativo.

Previamente a la conservación en bandejas, las comidas listas para comer generalmente se cocinan antes de colocarlas en el recipiente de embalaje. Sin embargo, en algunos casos, se puede evitar el paso de precocción si es factible cocinar el alimento posteriormente durante la pasteurización.

Dado que las tecnologías no térmicas (HHP, MAP) no permiten cocinar el alimento durante el tratamiento de conservación, con el fin de establecer condiciones equivalentes para una comparación adecuada entre las cuatro tecnologías, se ha considerado un paso específico de cocción para aquellos escenarios que involucran HHP y MAP. Esto es especialmente adecuado en el caso de MAP, que requiere un tratamiento térmico suave previo para mejorar la vida útil prevista. Además de esto, También se consideraron las diferencias en el material de empaque, y el gas (Pardo y Zufía., 2012).

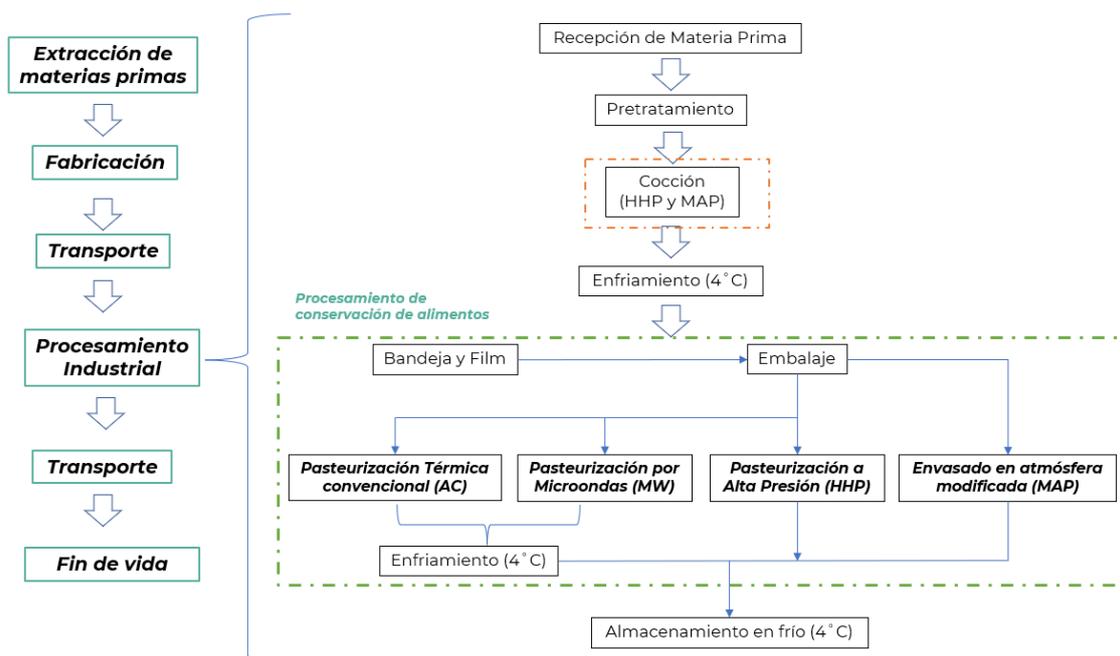


Figura 13. Tratamientos de pasteurización y envasado.

Las líneas discontinuas indican los pasos de elaboración del producto relacionados con la conservación de alimentos dentro de los límites del estudio. Se agregó el paso de cocción para el procesamiento de alta presión y métodos de envasado en atmósfera modificada (Pardo y Zufía., 2012).

Los siguientes aspectos se dejaron fuera de los límites del sistema:

- Etapas de elaboración del producto no relacionadas con la conservación de alimentos.
- Cajas de embalaje y materiales necesarios para el transporte de maquinaria.
- Materiales que representan menos del 1% del peso de la maquinaria.
- Infraestructuras y edificaciones necesarias para su tratamiento.

4.2. Análisis del Inventario

El análisis del inventario, así como la recopilación de datos y procedimientos de cálculo de los límites del sistema, se detallan a continuación.

Los tratamientos de pasteurización más eficientes y por ende mayormente comparables entre sí, y las condiciones de operación para cada uno de los procesos de pasteurización son las siguientes:

- **Pasteurización térmica (AC):** Tratamiento térmico mediante agua o vapor inyectado como medio térmico. La transferencia de calor al producto es indirecta, provocando pérdidas de calidad nutricional y sensorial en el producto. Las condiciones del proceso se desarrollan a una temperatura de 90 °C durante 35 minutos.
- **Microondas (MW):** Tratamiento térmico mediante exposición a microondas. La transferencia de calor al producto es eficiente, mientras que la pérdida de la calidad nutricional y sensorial de los alimentos es moderada. Las condiciones del proceso se desarrollan a una temperatura de 90 °C durante 35 minutos.
- **Alta Presión Hidrostática (HHP):** Procesamiento no térmico que somete altas presiones hidrostáticas a los alimentos. Produce ligeros cambios en la calidad de los alimentos originales, mediante sistemas discontinuos y semicontinuos. Las condiciones de operación se desarrollan a una presión de 500 MPa durante 8 minutos.
- **Campos Eléctricos Pulsados (PEF):** Tratamiento no térmico que aplica un campo eléctrico al producto durante un periodo muy corto de tiempo. La efectividad del tratamiento depende de la intensidad, el tiempo, la energía específica, la frecuencia y la temperatura.

Las condiciones del envasado son las siguientes:

- **Envasado en Atmósfera Modificada (MAP):** El proceso se basa en el cerramiento en materiales barrera a los gases, con ambiente gaseoso controlado. Se sustituye la atmósfera del envase por una mezcla de gases (N_2/CO_2). Aporta

frescura y características originales de la comida, aunque la vida útil del producto es muy limitada. La composición del gas es de 80% CO₂/20% N₂, mientras que la relación Gas/producto ratio = 1.5.

Las limitaciones en la calidad de los datos han acotado la consideración de las etapas del ciclo de vida, los procesos unitarios y los flujos. El estado actual del proyecto “FunTomp” se encuentra en los primeros meses de investigación, por ello, ante la imposibilidad de obtener datos primarios sobre los procesos de pasteurización a nivel industrial, se ha optado por reunir datos secundarios acordes a la madurez de los procesos actuales en literatura (Pardo y Zufía., 2012; Aganovic et al., 2017).

Cuando se hace referencia al enfoque “*Cradle-to-gate*”, se relaciona con los procesos de cultivo y transporte de materia prima para el acondicionamiento de los tomates, siendo equivalente a todos los tratamientos. En el caso de “*Gate-to-gate*” se refiere solo al proceso de pasteurización, donde también se complementa con MAP, común a todos los procesos de pasteurización.

Se han tomado las siguientes asunciones generales en relación con los límites del sistema:

Tabla 2. Asunciones generales del estudio.

Los indicadores incluyen todo el enfoque del estudio
Etapas de cultivo, transporte y pretratamiento comunes a todos los tratamientos
Tratamientos o etapas del ciclo de vida sin datos verificables se excluyen de la comparativa
Consumo energético de medio voltaje a nivel europeo para todos los tratamientos
Caracterización del uso de agua del grifo para todos los tratamientos, incluyendo los procesos de acondicionamiento para su utilización
Impacto del uso de polipropileno (PP) equivalente a todos los tratamientos y envasado
Fertilizante nitrogenado genérico para el cultivo de los tomates
Transporte europeo de camión de carga Euro6 (16-32 toneladas métricas)
Compostaje a nivel industrial para el tratamiento de los biorresiduos

Tabla 3. Asunciones específicas por tratamientos y envasado.

Tratamientos y Envasado	Asunciones
AC	- Compresor genérico de 600 kPa para aire comprimido - Consumo de H ₂ O ₂ para enfriamiento
MW	- Consumo de H ₂ O ₂ para enfriamiento
HHP	- Compresor de aire comprimido de 600 kPa y reajuste de las etapas de compresión a 500 MPa
MAP	- Gas (CO ₂ /N ₂) para el envasado

- Los tratamientos de HPU y UV para una pasteurización completa de los alimentos se encuentra en desarrollo y no se dispone de datos verificables para la realización de un ACV comparativo. Por esta razón, se ha decidido no contemplarlos en el estudio, ya que la comparativa no resultaría fidedigna. Por un lado, los ultrasonidos se aplican en procesos de extracción de compuestos de gran valor añadido (proteínas, polifenoles, etc.), mientras que, por otro lado, la radiación ultravioleta se centra en la eliminación de microorganismos específicos, derivando en una pasteurización muy poco eficiente.
- Los procesos seleccionados para el cálculo del impacto ambiental incluyen las etapas de producción/extracción de materias primas y el transporte hasta el complejo industrial donde se llevará a cabo el procesamiento industrial del producto.
- La infraestructura necesaria para los procesos industriales de pasteurización se ha considerado de acero inoxidable de baja aleación. Los datos se han estimado a nivel global (GLO), que representa las actividades que se consideran un promedio válido para todos los países del mundo.
- Los consumos de gas natural para el precocinado en los procesos de HHP y MAP procede de una central o de pequeña escala, los datos se han estimado a nivel europeo (RER).
- Para los datos de consumo energético en forma de electricidad se ha definido un voltaje medio a nivel europeo (RER).
- El consumo de agua se diversifica a través de dos procesos: uno durante el tratamiento de conservación para HHP debido a las condiciones de alta presión necesarias, y el otro para el enfriamiento del producto en todos los tratamientos, salvo en MAP que no necesita refrigeración. El indicador de consumo de agua se caracteriza por ser del grifo a nivel europeo (RER), es decir, no es necesario utilizar agua tratada, desionizada o ultrapura, porque no forma parte del producto final. De esta forma los consumos adicionales de tratar agua se ahorran y se podría reutilizar dicha agua como medida de mejora.
- El indicador del vapor empleado durante el tratamiento AC es abastecido exclusivamente por la industria química que lo produce, se excluyen otras actividades que producen vapor como subproducto, por lo que el consumo de vapor se abastece por defecto del vapor producido utilizando la mezcla energética promedio que se estima que se utilizará para la producción de vapor en la industria química dentro de la geografía europea (RER).
- El conjunto de datos del aire comprimido representa el mercado de 600 kPa en Europa (RER). En general, se considera que el aire comprimido se consume donde se produce y no se requiere transporte. El propósito de esta actividad de mercado es representar una mezcla de mercado de aire comprimido generado a partir de distintas tecnologías. Para el tratamiento por AC se ha considerado el

indicador genérico de 600 kPa, pero para el tratamiento de HHP, se ha reajustado en los siguientes apartados.

- El gas (CO₂/N₂) empleado para la conservación del producto solo se utiliza en MAP, ya que es necesario para mantener unas condiciones óptimas de calidad ajustadas a su corta vida útil. Se ha seleccionado tanto nitrógeno como dióxido de carbono licuados, práctica habitual en diversos sectores industriales. Los datos son a nivel europeo (RER).
- El consumo de H₂O₂ es sin presencia de agua y en estado de solución al 50%, el proceso se ha escogido a nivel europeo (RER).
- Se consume la misma cantidad de PP para el embalaje, contribuyendo con el mismo impacto en todos los procesos. La única diferencia está en el empleo de EVAL (Etilen-Vinil-Alcohol) en MAP que se ha escogido como indicador el copolímero de etileno acetato de vinilo (RER) como aproximación.
- El fertilizante escogido para el cultivo de los tomates se corresponde con fertilizante genérico nitrogenado.
- El transporte de materia prima se define por carretera, con un camión Euro6 de 16-32 toneladas métricas de carga.
- Se generan residuos orgánicos de materia prima durante el pretratamiento, exactamente 0.11 kg residuo por cada 1.11 kg de entrada de tomates.
- El reciclaje de las botellas de PET no se ha incluido en el estudio por falta de datos. Asimismo, el impacto de la construcción no se ha tenido en cuenta porque la proporción de infraestructura y equipos es ínfima.

Los datos de entrada por unidad funcional (1 kg de producto de tomate pasteurizado) se detallan a continuación:

Tabla 4. Datos de entrada del inventario por UF de 1 kg de producto de tomate pasteurizado (Cradle-to-gate).

Cradle-to-gate	Inputs	Unidades	Pretratamiento
Producción de materia prima	Electricidad	MJ	0.80
	Gas Natural	MJ	8.89
	Transporte	tkm	0.38
	Agua	kg	2.00
	Fertilizante	g	0.50
	Materia prima (tomates)	kg	1.11
	Outputs	Unidades	Compostaje
	Materia prima (residuo)	kg	0.11

Tabla 5. Datos de entrada del inventario por UF de 1 kg de zumo de tomate pasteurizado (Gate-to-gate).

Gate-to-gate	Inputs	Ud.	Pasteurización				Envasado
			AC	MW	HHP	PEF	MAP
Precocinado	Gas natural	Wh	-	-	76.5	-	76.5
Tratamiento de conservación	Electricidad	Wh	5.5	320.0	200.0	121.0	104.0
	Agua	ton	-	-	0.5	2.2	-
	Vapor	kg	1.1	-	-	-	-
	Aire comprimido	l	9.1	-	0.7	-	-
Enfriamiento	Gas (CO ₂ /N ₂)	l	-	-	-	-	1.5
	Electricidad	Wh	26.6	26.6	9.5	-	-
	Agua	kg	3.1	3.1	1.4	-	-
Embalaje	H ₂ O ₂	g	2.0	2.0	-	-	-
	Polipropileno (PP)	g	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5
	EVAL (Etilen-Vinil-Alcohol)	g	-	-	-	-	5.0

La composición del gas de la atmósfera para MAP se compone en un 80% de CO₂ y en un 20% de N₂. El inventario del proceso de pasteurización proporciona los datos totales del gas en litros, lo que resulta incompatible con la determinación de la contribución de dicho gas al impacto total del proceso, ya porque los indicadores consideran las unidades en masa (kg). Por ello se ha procedido a calcular la masa de cada compuesto (CO₂ y N₂) en la mezcla total.

1º. Se determinan las masas moleculares (Mr) de cada compuesto:

- CO₂ = 44 g/mol
- N₂ = 28 g/mol

2º. Calcular la densidad de cada compuesto a través de la ecuación de los gases ideales:

$$P * V = n * R * T$$

Donde: P = Presión; V = Volumen; n = moles; R = Constante de los gases ideales; T = Temperatura

Sabiendo que la masa (m) es igual a la Masa molecular (Mr) por el número de moles:

$$m = Mr * n$$

Teniendo en cuenta que la densidad (ρ) es masa (m) entre volumen (V):

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Se sustituye:

$$P * \frac{m}{\rho} = \frac{m}{Mr} * R * T$$

Se obtiene:

$$\rho = \frac{P * Mr}{R * T}$$

Densidad del CO₂:

$$\rho_{CO_2} = \frac{1 \text{ atm} * 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{K} * \text{mol}} * 273 \text{ K}} = 1.97 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del N₂

$$\rho_{N_2} = \frac{1 \text{ atm} * 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{K} * \text{mol}} * 273 \text{ K}} = 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3°. Calcular la masa de cada compuesto en 1.5 L de gas (80% v/v CO₂/ 20% v/v N₂):

$$m_{CO_2} = \rho * V = 1.98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.001 \text{ m}^3 * 1.2 = 0.00236 \text{ kg de CO}_2$$

$$m_{N_2} = \rho * V = 1.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0.001 \text{ m}^3 * 0.3 = 0.00038 \text{ kg de N}_2$$

4.3. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha escogido el modelo de caracterización ReCiPe 2016 *midpoint* jerarquista. Para la selección de las categorías de impacto se siguen recomendaciones de la literatura (Pardo y Zufía., 2012; Guinée et al., 2001).

Los procesos de cultivo y transporte del tomate (“*Cradle-to-gate*”) hasta la fábrica, son los mismos para todos los procesos de pasteurización, contribuyendo de igual medida en cada uno de ellos. Por ello, el estudio se centra más concretamente en la etapa de pasteurización, teniendo en cuenta unos datos más compactos y validados para la comparativa.

Las categorías de impacto seleccionadas van en consonancia con el objetivo y alcance del estudio. Porque son procesos en los que se emiten gases de efecto invernadero, asociados con categorías como calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico y acidificación terrestre. Por otra parte, el consumo de agua en los procesos supone un énfasis en categorías relacionadas con el agua, como son la eutrofización marina y de agua dulce, y consumo de agua. Finalmente, la categoría de uso del suelo se asocia al cultivo principalmente, ya que es donde se desarrolla y también al transporte por carretera.

Tabla 6. Categorías de Impacto. ReCiPe 2016 v1.1. *midpoint*, Hierarchist version.

Categorías de Impacto	Unidades
Calentamiento global (CG)	kg CO ₂ eq
Agotamiento del ozono estratosférico (AOE)	kg CFC-11 eq
Acidificación terrestre (AT)	kg SO ₂ eq
Eutrofización de agua dulce (EAD)	kg P eq
Eutrofización marina (EM)	kg N eq
Uso del suelo (US)	m ² ·año eq
Consumo de agua (CA)	m ³

El sistema de asignación “Cut-off” se basa en que la producción primaria de los materiales siempre se asigna al usuario principal de un material, si se recicla un material el productor primario no recibe ningún crédito por el suministro de materiales reciclables. Como consecuencia, los materiales reciclables se encuentran sin ninguna carga para los procesos de reciclaje, lo que significa que los materiales secundarios (reciclados) solo soportan los impactos de los procesos de reciclaje. Este sistema no otorga ningún crédito a los productores de residuos por el reciclaje.

Los indicadores que mejor se ajustan al inventario del ciclo de vida son los siguientes:

Tabla 7. Indicadores para cada uno de los Inputs. Base de datos Ecoinvent 3.6.

Inputs	Ud.	Indicadores ICV
Acero	1 kg	Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, U
Gas Natural	1 kWh	Heat, central or small-scale, natural gas {RER} market group for Cut-off, U
Electricidad	1 kWh	Electricity, medium voltage {RER} market group for Cut-off, U
Agua	1 kg	Tap water {RER} market group for Cut-off, U
Vapor	1 kg	Steam, in chemical industry {RER} market for steam, in chemical industry Cut-off, U
Aire comprimido	1 m ³	Compressed air, 600 kPa gauge {RER} market for compressed air, 600 kPa gauge Cut-off, U
Gas (N ₂)	1 kg	Nitrogen, liquid {RER} market for Cut-off, U
Gas (CO ₂)	1 kg	Carbon dioxide, liquid {RER} market for Cut-off, U
Electricidad	1 kWh	Electricity, medium voltage {RER} market group for Cut-off, U
Agua	1 kg	Tap water {RER} market group for Cut-off, U
H ₂ O ₂	1 kg	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state Cut-off, U
PP	1 kg	Polypropylene, granulate {GLO} market for Cut-off, U
EVAL (Etilen-Vinil-Alcohol)	1 kg	Ethylene vinyl acetate copolymer {RER} market for ethylene vinyl acetate copolymer Cut-off, U
Transporte	1 tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro6 {RER} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U
Fertilizante	1 kg	Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for Cut-off, U
Compostaje	1 kg	Biowaste {RoW} treatment of biowaste, industrial composting Cut-off, U

La mayoría de los indicadores se ajustan a los inputs y sus unidades con previos ajustes, obteniendo un buen resultado de evaluación del impacto.

Aunque el único reajuste ha sido con el compresor de aire, que como indicador tiene en cuenta un compresor de 600 kPa, se ha adaptado a la presión del inventario de 500,000 kPa para el tratamiento HHP. Para ello, se ha recalculado las etapas de compresión que hacen falta para esa presión.

Si la compresión es elevada como en este caso, se aconseja la compresión por etapas. Entre sus razones están las dificultades mecánicas, si el incremento de presión es elevado el volumen se reduce mucho. El rendimiento es máximo cuando $r = 2.5 - 5$, disminuyendo cuando se acerca el valor a 5. El trabajo de compresión isoentrópica escalonada es inferior al de la compresión en una sola etapa. Si se acerca al trabajo isoterma el número de etapas aumenta. Para calcular el número de etapas se reajusta según:

$$\left(\frac{P_N}{P_0}\right)^{1/N} = r$$

r = rendimiento; P_N = presión a estudio; P_0 = presión inicial; N = número de etapas de compresión

Donde: $r = 2.5 - 5$; $P_N = 500000$ kPa; $P_0 = 600$ kPa

Resolviendo se obtiene un valor de $N \approx 5$ etapas de compresión. Dichas etapas se multiplican por el indicador del aire comprimido en el tratamiento HHP.

4.4. Interpretación de Resultados

En primer lugar, se exponen los impactos ambientales absolutos del enfoque “Cradle-to-gate”, es decir, los referentes al cultivo/recolección de los tomates y su transporte hasta la fábrica.

Tabla 8. Impactos totales del cultivo/recolección, transporte y gestión de desechos por cada categoría de impacto.

Categorías de Impacto	Ud.	Consumos					Desechos
		Electricidad	Gas Natural	Transporte	Agua	Fertilizante	Compostaje
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	9.36E-02	6.80E-01	6.20E-02	6.84E-04	5.37E-03	7.32E-03
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	5.31E-08	1.50E-07	4.48E-08	3.53E-10	1.14E-07	3.18E-08
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	3.57E-04	5.18E-04	1.18E-04	2.71E-06	2.15E-05	1.60E-04
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	9.15E-05	2.52E-05	4.63E-06	5.06E-07	7.50E-07	8.30E-07
Eutrofización marina	kg N eq	6.49E-06	2.57E-06	3.98E-07	4.82E-08	6.75E-08	2.04E-07
Uso del suelo	m ² -año eq	3.41E-03	1.20E-03	2.69E-03	2.25E-05	7.93E-05	3.67E-04
Consumo de agua	m ³	1.60E-03	4.02E-04	1.00E-04	2.01E-03	4.75E-05	-1.58E-06

En referencia a la modelación del tomate, el cultivo de la planta de tomate tiene un efecto intrínseco positivo, en cuanto a la absorción de CO₂ y la producción de oxígeno (O₂) mediante la fotosíntesis, entonces se produce un ahorro de impactos en CO₂. Por otro lado, la planta ocupa un espacio durante su ciclo de vida y genera impacto en el uso del suelo, tanto impacto (m²-año eq) como superficie ocupada (m²/año).

Respecto a las entradas de materia prima, entran 1.11 kg de tomate cultivado por cada 1 kg de zumo de tomate que se pasteuriza. La diferencia entre ellos se contabiliza como desecho de materia prima orgánica, realizándose un posterior proceso de compostaje para la gestión de los residuos. La fase de compostaje también genera impactos por

cada kg que se trate, teniendo especial atención en la categoría de consumo de agua, porque el procesamiento provoca que los residuos orgánicos se sequen y esa pérdida de humedad se emita al medio.

En segundo lugar, se representa la contribución de cada entrada/salida del sistema al impacto total. Considerando el compostaje como salida, pero su proceso de gestión también provoca impactos ambientales dentro de los límites del cultivo y pretratamiento. Se ha excluido la categoría de impacto de consumo de agua, porque es en la única donde los resultados del compostaje son negativos (-), esto quiere decir que el proceso de compostaje ahorra impactos al liberar agua al medio.

Los mayores impactos proceden del consumo de gas natural (2.49 kWh/kg de zumo pasteurizado), en categorías como calentamiento global (80%), acidificación terrestre (43%), agotamiento del ozono estratosférico (38%). Mientras que el consumo de electricidad (0.22 kWh/kg de zumo pasteurizado) contribuye con mayores impactos en el resto de las categorías de impacto.

El uso de fertilizante nitrogenado causa disminución de la capa de ozono, por ello en la categoría del ozono contribuye con casi un 30% del impacto total, mientras que en el resto de las categorías pasa desapercibido al ser un impacto ínfimo.

El transporte emite numerosos compuestos, entre ellos CO₂, principal precursor del calentamiento global, aportando un 8% de impacto en dicha categoría. Mientras que, en el uso del suelo, contribuye enormemente por la ocupación que genera durante los trayectos por carretera. En las categorías de acidificación y agotamiento del ozono contribuye con un 10% de impacto aproximadamente en cada una, y en el resto apenas un 5%.

El proceso de compostaje genera emisiones en categorías como agotamiento del ozono y acidificación del medio, debido a las sustancias gaseosas como el amoníaco (NH₃) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). También contribuye en el uso del suelo por el espacio que ocupa durante el proceso.

Por último, el consumo de agua apenas aporta impactos en las categorías, salvo en la de consumo de agua que prevalece como máximo contribuyente.

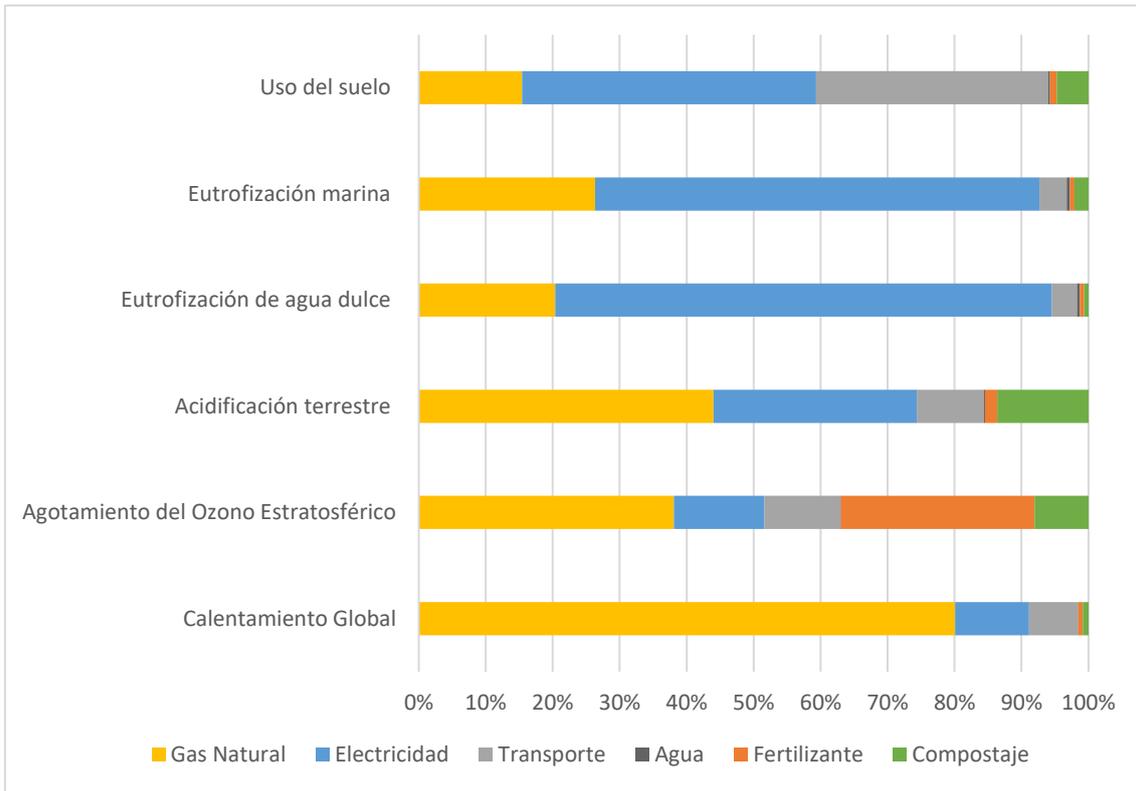


Figura 14. Contribución de cada entrada al impacto total del pretratamiento de la materia prima en cada categoría de impacto.

A continuación, se detallan los impactos absolutos del enfoque “Gate-to-gate”, es decir, de los tratamientos de pasteurización y envasado.

Tabla 9. Impactos totales de los tratamientos de pasteurización y envasado por cada categoría de impacto.

Categorías de Impacto	Ud.	Tratamientos de Pasteurización				Envasado
		AC	MW	HHP	PEF	MAP
Calentamiento global	kg CO ₂ eq	4.41E-01	2.71E-01	4.02E-01	2.84E-01	1.99E-01
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC-11 eq	1.07E-07	1.06E-07	1.65E-07	1.14E-07	5.36E-08
Acidificación terrestre	kg SO ₂ eq	1.08E-03	8.96E-04	1.36E-03	9.49E-04	5.44E-04
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	6.68E-05	1.66E-04	2.36E-04	1.80E-04	6.79E-05
Eutrofización marina	kg N eq	4.98E-06	1.21E-05	2.01E-05	1.30E-05	5.25E-06
Uso del suelo	m ² · año eq	4.48E-03	6.37E-03	9.86E-03	6.88E-03	2.81E-03
Consumo de agua	m ³	4.89E-03	6.83E-03	5.07E-01	6.06E-03	2.03E-03

La contribución del impacto de cada tecnología de tratamiento de pasteurización y envasado, en las categorías de impacto se aprecian en las Figuras 15-19. Donde se desglosan las entradas y consumos para evaluar el impacto de cada uno de ellos.

En la Figura 15 se muestra la contribución al impacto total de cada entrada a los límites del sistema para el tratamiento por AC.

El consumo de vapor sobresale por encima del resto con más de un 50% de contribución en algunas categorías (calentamiento global, agotamiento del ozono, acidificación y uso del suelo). La corriente de vapor es abastecida por la industria química, parte de su impacto se genera en su producción industrial ya que posteriormente se transporta hasta la industria alimentaria donde se consume. El tratamiento por AC es el único que consume este tipo de flujo.

Por otro lado, el impacto del aire comprimido apenas se aprecia en el sistema de AC. En general según el indicador de Ecoinvent 3.6, el aire comprimido se produce donde se consume, por lo que la industria alimentaria debe tener la infraestructura disponible en sus instalaciones.

El impacto de la electricidad como entrada al sistema contribuye entre un 3% en la categoría de calentamiento global hasta un 20% en las categorías de eutrofización. Se tiene en cuenta que, en el tratamiento por AC, no se ha separado el consumo de electricidad correspondiente a la generación del aire comprimido ni del vapor, debido a que no existen datos disponibles y está intrínsecamente incluido en su impacto total.

El uso de agua solo impacta en la categoría de consumo de agua como cabría esperar, aunque si se tomase alguna propuesta de mejora (reciclado interno, buenas prácticas, etc.) disminuiría dicho impacto.

Por último, el consumo de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) para el enfriamiento es tan bajo (2 g/kg de producto) que contribuye poco al impacto total, con valores máximos en torno al 3% en algunas categorías. El peróxido de hidrógeno es un compuesto inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua cuando se libera calor. Aunque no es inflamable, es un agente oxidante potente que puede causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica. Una de las ventajas es que no se acumula en la cadena alimentaria, ya que forma parte del sistema de refrigeración, favoreciendo su uso en las etapas de conservación de alimentos.

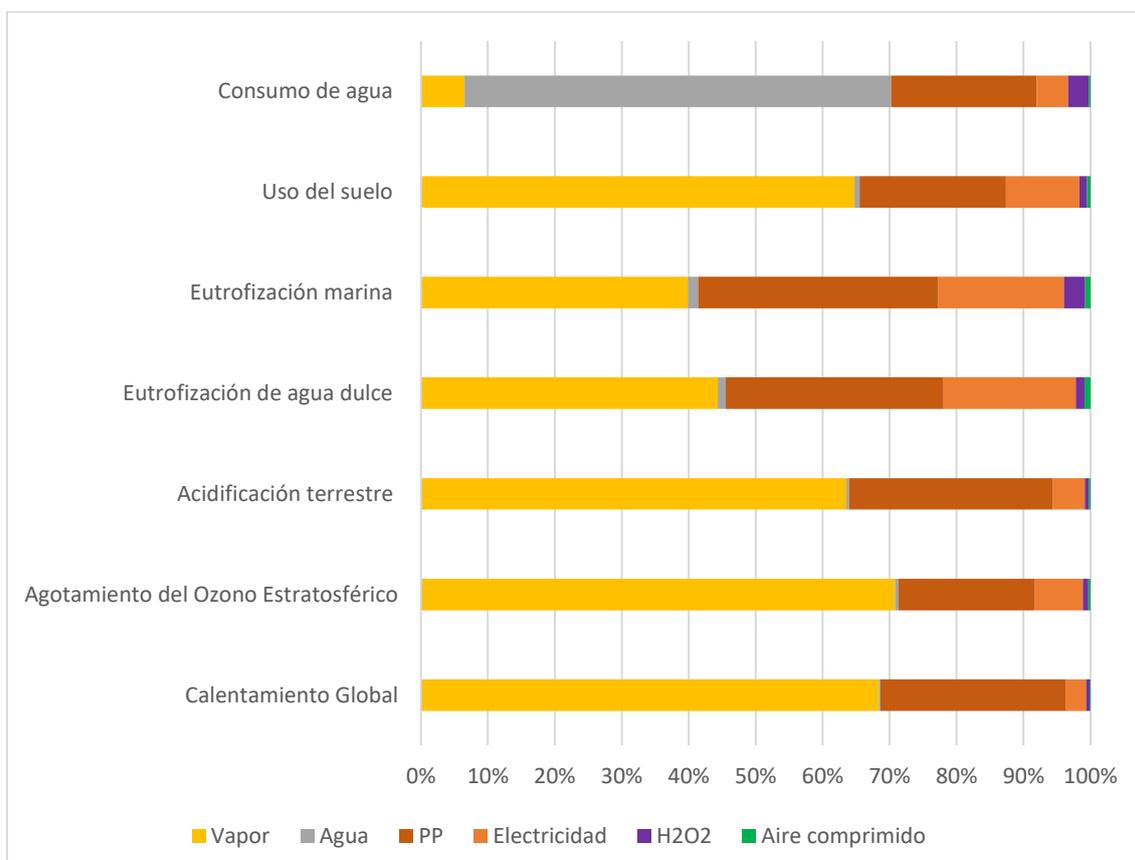


Figura 15. Contribución de cada entrada al impacto total en cada categoría de impacto para el tratamiento de AC.

En la Figura 16 se observa la contribución al impacto total de cada entrada para el tratamiento por MW.

El consumo energético contribuye entre un 25% (categoría de consumo de agua) y un 85% (eutrofización de agua dulce) a lo largo de las categorías de impacto, debido a que se consumen grandes cantidades de electricidad para la conservación del producto y posterior enfriamiento.

El consumo de agua es bajo en el sistema de enfriamiento, contribuyendo al impacto en la categoría de consumo de agua, mientras que en el resto apenas se aprecia.

El consumo de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) es bajo (2 g/kg de producto), resultando por tanto en un impacto poco significativo respecto del total.

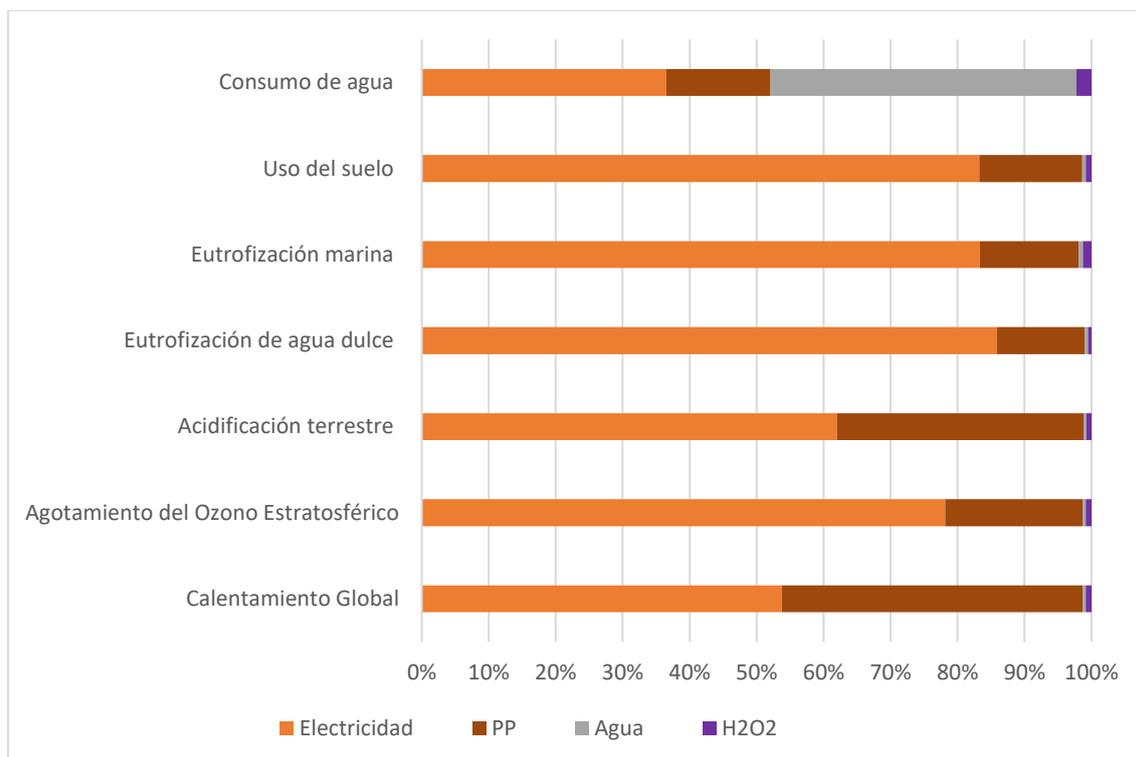


Figura 16. Contribución de cada entrada al impacto total en cada categoría de impacto para el tratamiento de MW.

En la Figura 17 se detalla la contribución al impacto total de cada entrada para el tratamiento por HHP.

Durante el tratamiento HHP, el consumo de agua contribuye desde un 42% (calentamiento global) hasta casi el 100% (categoría de consumo de agua, CA). Prácticamente la totalidad del agua se utiliza durante el tratamiento de conservación, mientras que durante el enfriamiento es muy poca la cantidad utilizada. Cuando aumenta la presión, disminuye el volumen de agua, dando lugar al proceso de pasteurización fría. Al producirse a baja temperatura, no se producen cambios en la calidad original del producto.

El consumo energético, y en este caso de electricidad, es considerable debido a las condiciones de operación (altas presiones y corto tiempo de pasteurización). Concretamente, el impacto contribuye al total entre un 20% (categoría de calentamiento global y acidificación terrestre) y 36% (uso del suelo y eutrofización).

El consumo de aire comprimido es muy bajo y apenas se aprecia, en la base de datos el aire comprimido se produce donde se consume, requiriendo consumos energéticos para producirlo.

El consumo de gas natural contribuye en un 5% al impacto total en la categoría de calentamiento global, mientras que va disminuyendo en el resto.

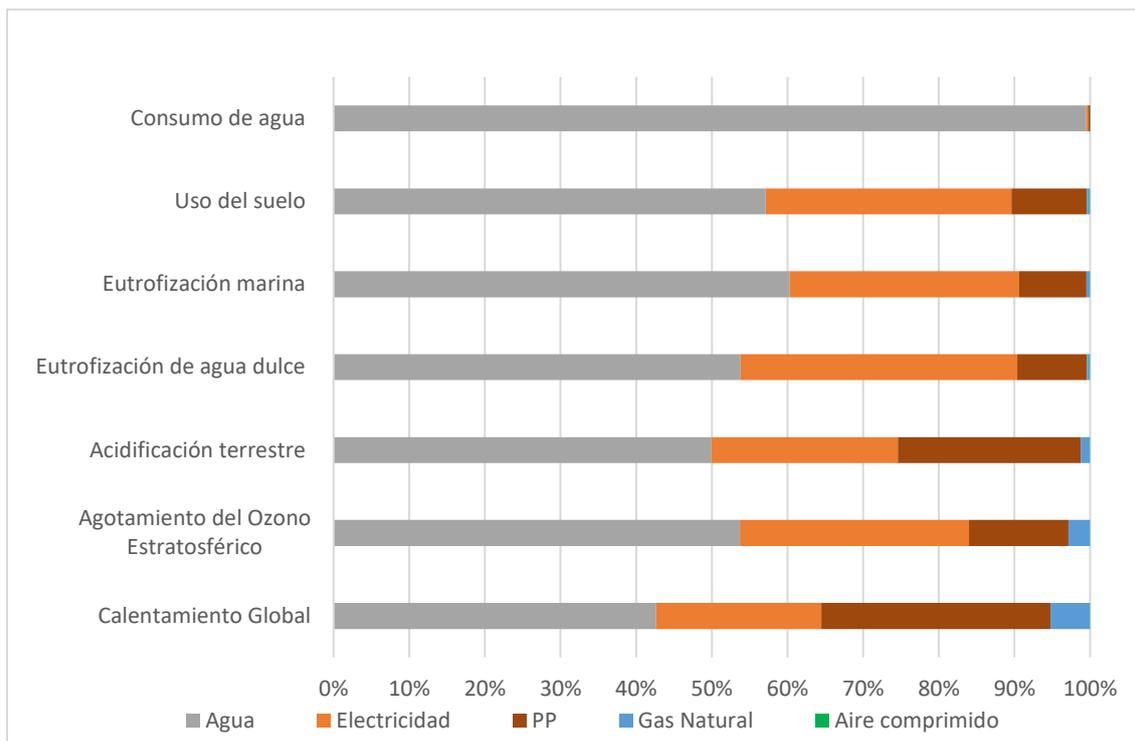


Figura 17. Contribución de cada entrada al impacto total en cada categoría de impacto para el tratamiento de HHP.

En la Figura 18 se observa la contribución al impacto total de cada entrada para el tratamiento por PEF.

El consumo energético contribuye al impacto total entre un 45% (categoría de consumo de agua) y un 88% (eutrofización de agua dulce), debido a que se consumen grandes cantidades de electricidad para la conservación del producto.

El consumo de agua se utiliza en bajas cantidades para la conservación. Por tanto, contribuye al impacto total en mayor medida en la categoría de consumo de agua, mientras que en el resto apenas se aprecia.

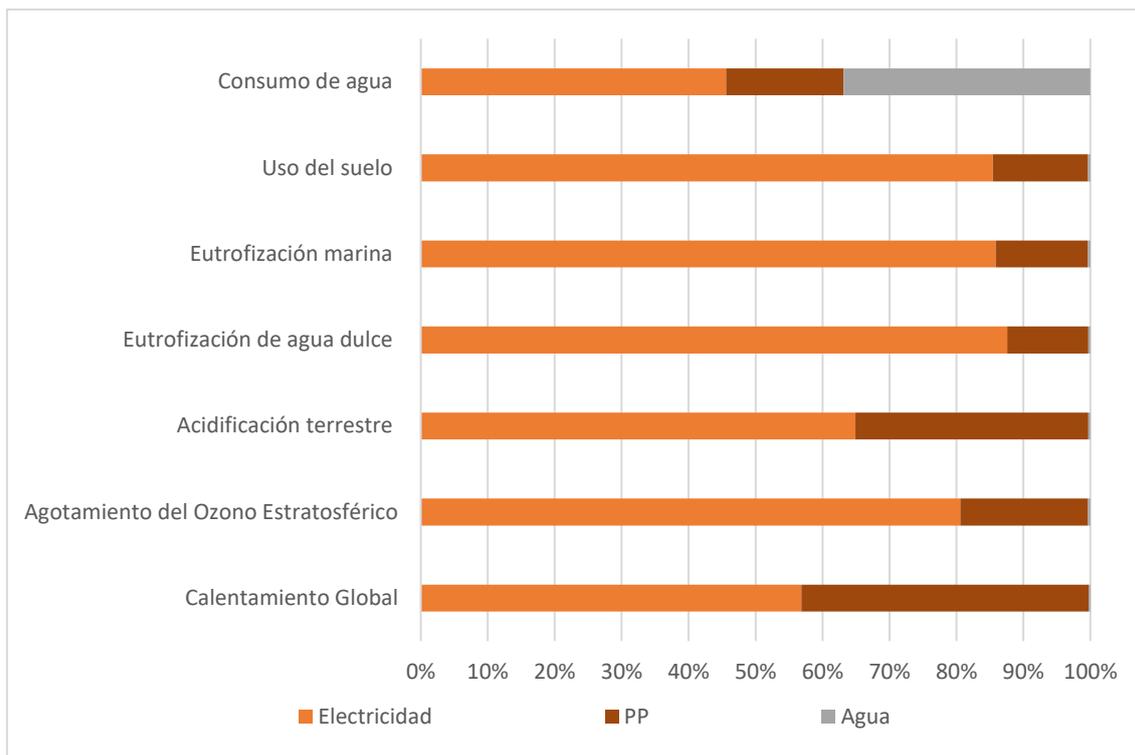


Figura 18. Contribución de cada entrada al impacto total en cada categoría de impacto para el tratamiento de PEF.

En la Figura 19 se observa la contribución al impacto total de cada entrada en los límites del sistema para el envasado por MAP.

El impacto del consumo energético (0.104 kWh) a través de la electricidad varía a lo largo de las categorías de impacto, situándose entre un 22% (calentamiento global) y un 62% (eutrofización de agua dulce).

Por otro lado, el impacto del consumo energético mediante gas natural (0.0765 kWh) durante el precocinado es mucho menor que el asociado al eléctrico.

El EVAL, aproximado como copolímero de etileno vinil acetato en este estudio, es de 5 g/kg de producto, se utiliza por las condiciones de operación y vida útil del producto, ya que en el MAP se busca una vida útil corta para mantener el producto óptimo y fresco. Su contribución al impacto total se sitúa entre un 3% (eutrofización de agua dulce) y un 10% (consumo de agua).

La mezcla de gases que se le aplica a la atmósfera protectora (80% CO₂/20% N₂) contribuye en un 3% a la categoría de eutrofización marina, mientras que en el resto de las categorías va disminuyendo.

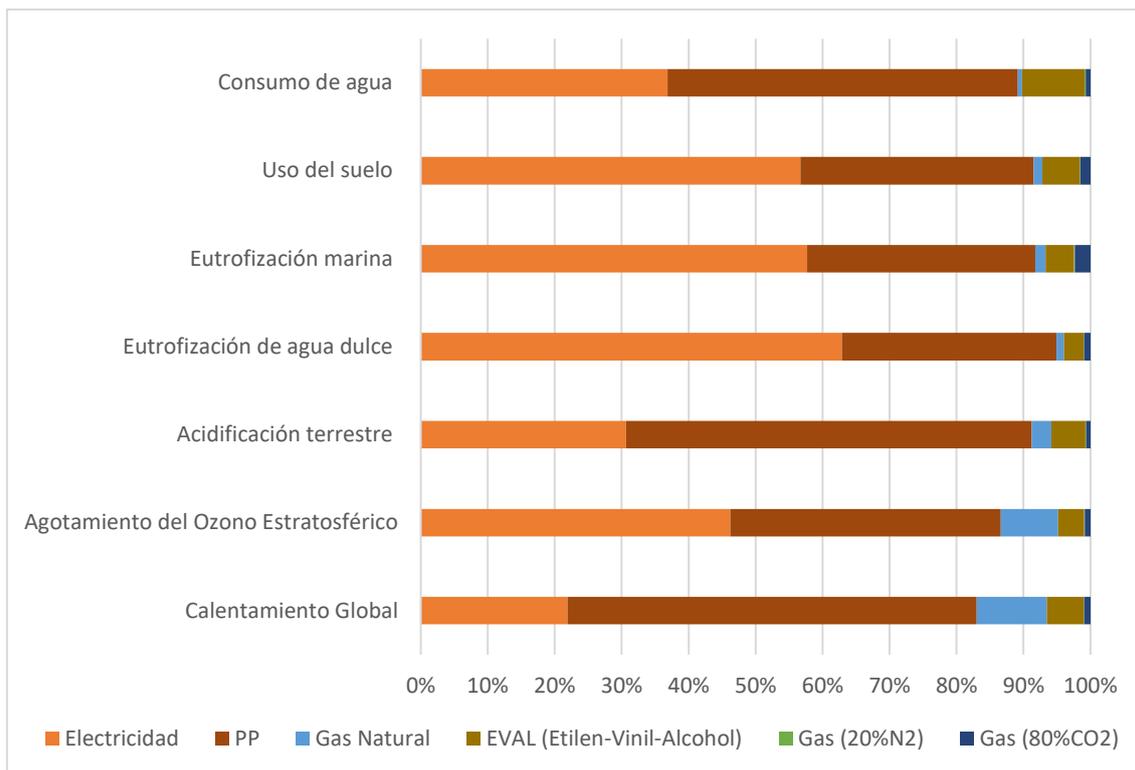


Figura 19. Contribución de cada entrada al impacto total en cada categoría de impacto para el envasado de MAP.

La Figura 20 muestra la contribución del cultivo y transporte, y los tratamientos de pasteurización al impacto total.

En el tratamiento mediante AC, el cultivo y transporte contribuye con más del 50% de impacto en prácticamente todas las categorías, salvo en acidificación y consumo de agua para las cuales se sitúa en torno a dicho valor. Cuando prevalece el impacto del cultivo y transporte, es debido a las emisiones de CO₂, NO_x y demás gases de efecto invernadero procedentes de la combustión de combustibles fósiles

Respecto al tratamiento por MW, el cultivo y transporte predomina en categorías tales como calentamiento global y agotamiento del ozono, contribuyendo en más de un 75% a la carga ambiental de estas categorías. Este hecho se asocia principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, la pasteurización mediante MW se impone en eutrofización y consumo de agua, debido a los consumos directos de agua y al posible impacto que genera en los ecosistemas acuáticos de mar y agua dulce.

Con relación al tratamiento por HHP, el impacto del proceso de pasteurización se impone a las etapas de cultivo y transporte en cinco de las siete categorías evaluadas, debido a los diversos consumos durante el proceso, que van desde la electricidad y el agua hasta el gas natural y el aire comprimido. Por otra parte, el cultivo y transporte sigue prevaleciendo en calentamiento global y agotamiento del ozono debido a las emisiones de la combustión de combustibles fósiles.

Por último, los resultados obtenidos para el tratamiento mediante PEF siguen una tendencia muy similar a la observada en el tratamiento por MW. Predomina el cultivo y

transporte en las categorías de calentamiento global y agotamiento del ozono, mientras que se igualan los impactos en acidificación y uso del suelo. Finalmente, la pasteurización por PEF se impone en eutrofización y consumo de agua.

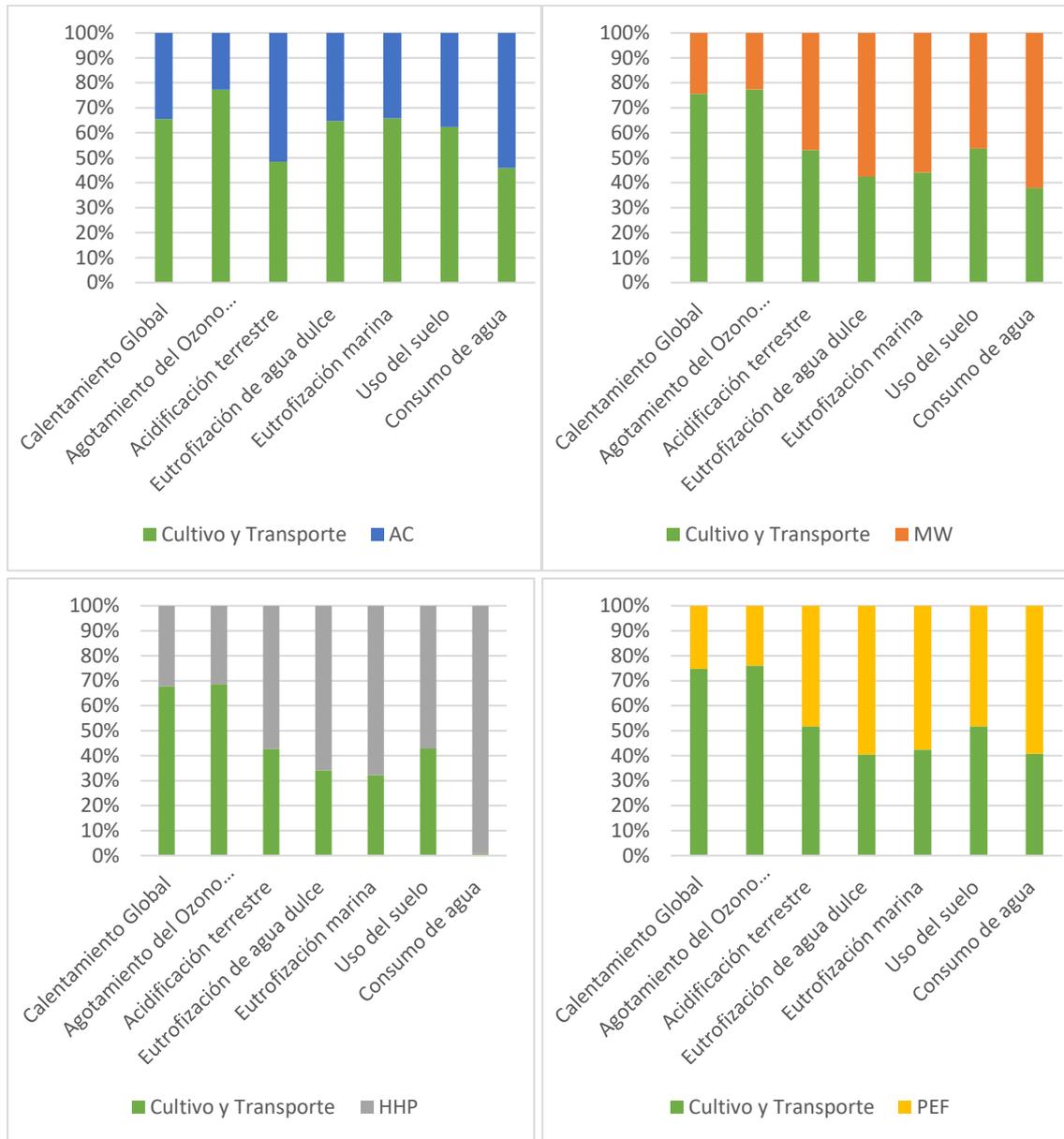


Figura 20. Contribución del cultivo y transporte, y tratamiento de pasteurización al impacto total.

En la Figura 21 se aprecia que no existen diferencias de impacto entre un envasado convencional y el MAP estudiado. La incorporación de gases como el CO₂ y el N₂ no provocan aumento de impactos ambientales, de esta forma se descubrió que MAP es la opción más sostenible cuando se requiere un período de vida útil inferior a 30 días (Pardo y Zufía., 2012).

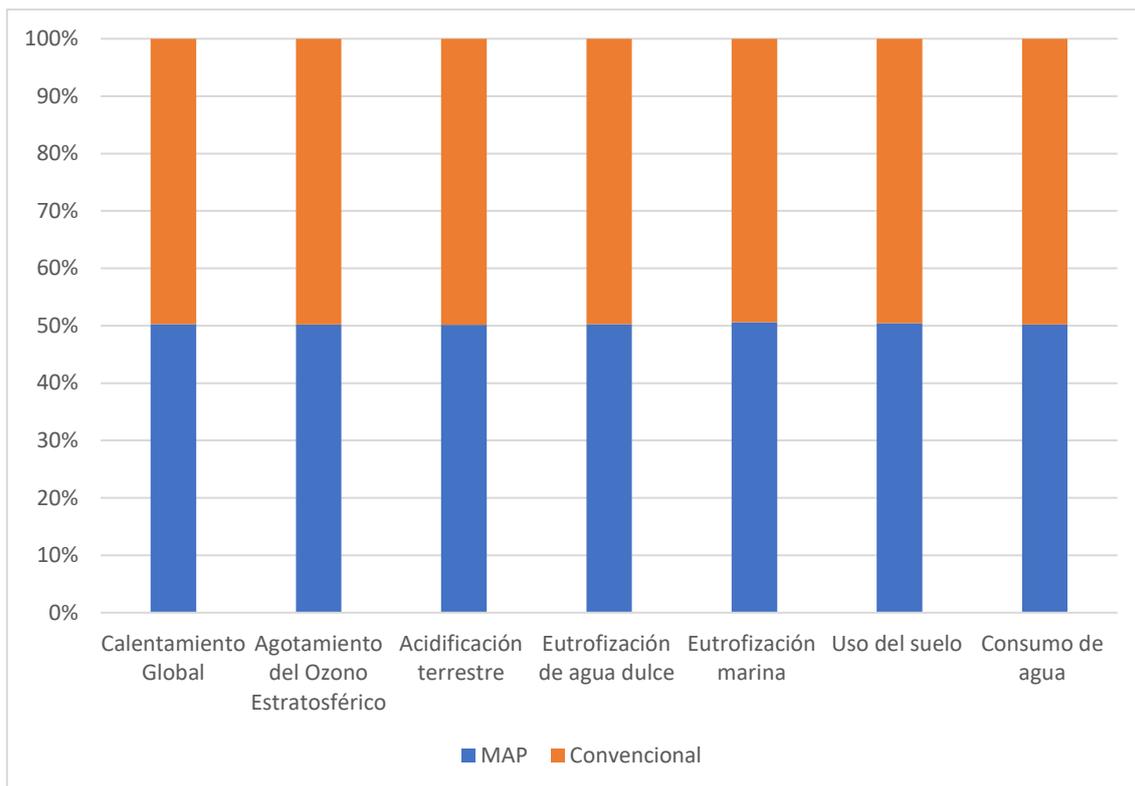


Figura 21. Comparativa de impactos envasado MAP respecto al convencional.

Los resultados obtenidos permiten comparar los cuatro tratamientos de pasteurización evaluados en este trabajo.

Para poder realizar una comparativa visual de los distintos tratamientos, se ha normalizado cada categoría de impacto sobre el valor más alto obtenido para cada una de ellas para el conjunto de procesos evaluados.

Tal y como muestra la Figura 22, se puede apreciar que HHP presenta las mayores cargas ambientales para todas las categorías de impacto evaluadas, a excepción de la categoría de calentamiento global, que prácticamente tiene el mismo impacto que el tratamiento por AC.

Profundizando en el análisis comparativo, la categoría de impacto de consumo de agua está prácticamente monopolizada por el tratamiento por HHP. Por tanto, dicha categoría se descarta para el análisis comparativo. De esta forma el análisis comparativo es más compacto y se apreciará mejor las diferencias, para posteriormente decantarse por uno de los mejores tratamientos, que radicará en una buena conservación del jugo de tomate con una larga vida útil y en equilibrio con los consumos energéticos, derivando en el menor impacto ambiental.

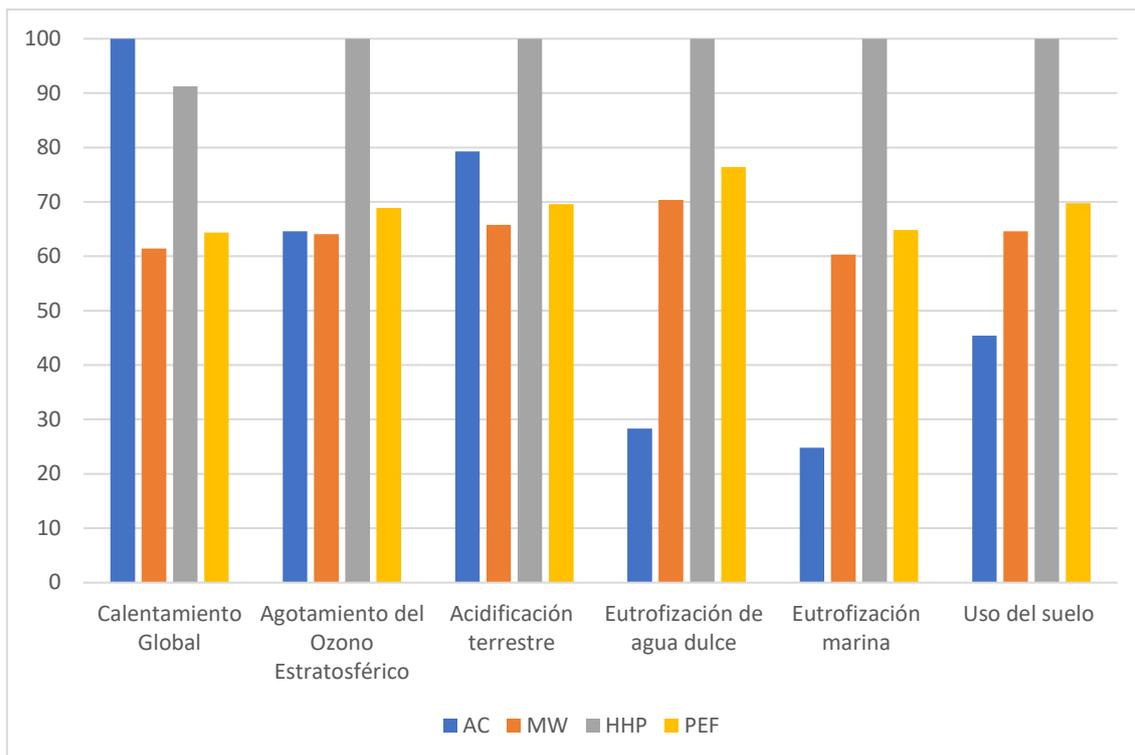


Figura 22. Comparación de tratamientos en relación con el de máximo impacto (1).

Aproximadamente, los impactos de HHP son entre un 25% y un 40% más altos que los de MW y PEF, mientras que entre ellos dos son muy equivalentes, debido al consumo de agua por parte de HHP. Para el estudio se entendió que el consumo de agua en el inventario es por cada unidad funcional, de esta forma el impacto se incrementa. Mejorando la eficacia con el uso del agua disminuirían los impactos hasta colocarse a la misma altura que el resto. Al mismo tiempo, MW y PEF consumen mayor cantidad de electricidad que HHP, pero no de gas natural, cosa que le ocurre a HHP que consume menos electricidad, pero el gas natural hace equilibrar la balanza de impactos y asemejarse entre tratamientos.

El tratamiento térmico por AC presenta cargas ambientales similares a las observadas para el HHP en la categoría de calentamiento global, aunque los impactos de cada uno proceden de diferentes consumos. El AC consume menos electricidad, pero a su vez consume vapor procedente de la industria química, que es el causante del aumento de impactos en la categoría de CG.

A continuación, en la Figura 23 se excluye de la comparativa el tratamiento por HHP al ser el de mayor impacto, de esta forma se puede observar los impactos corregidos por el valor más alto dentro de cada categoría con mayor detalle.

El tratamiento por AC presenta mayores cargas ambientales en calentamiento global y en acidificación, dos de las categorías más importantes a tener en cuenta, ya que están interrelacionadas con la emisión de gases de efecto invernadero CO_2 y SO_2 , precursores del cambio climático, reaccionan en la atmósfera dando lugar a aerosoles de azufre y acidificando el medio. También se deriva en un agotamiento de la capa de ozono por parte de las emisiones de CFC, que con su gran estabilidad es muy destructivo. En

definitiva, el tratamiento por AC prevalece en las categorías de calentamiento global, agotamiento del ozono y acidificación terrestre.

En el caso del tratamiento MW, el gran consumo eléctrico deriva en una contribución prácticamente igualitaria en todas las categorías por encima del 83% respecto del máximo valor, salvo en calentamiento global que es del 60% respecto al máximo del AC. Por otra parte, el tratamiento por PEF es muy similar al del MW, consume solo electricidad y agua en el proceso.

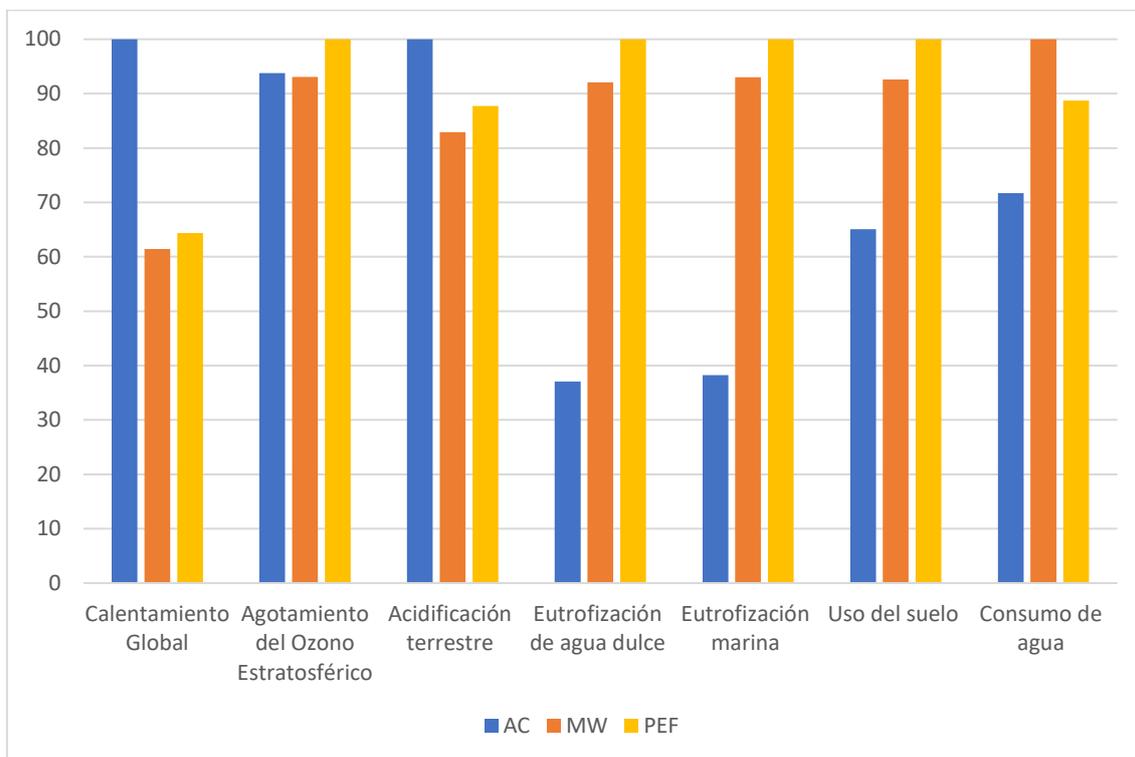


Figura 23. Comparación de tratamientos en relación con el de máximo impacto (2).

La Figura 24 muestra los resultados obtenidos para las categorías de impacto, con la finalidad de observar detenidamente los valores absolutos del impacto de cada uno de ellos.

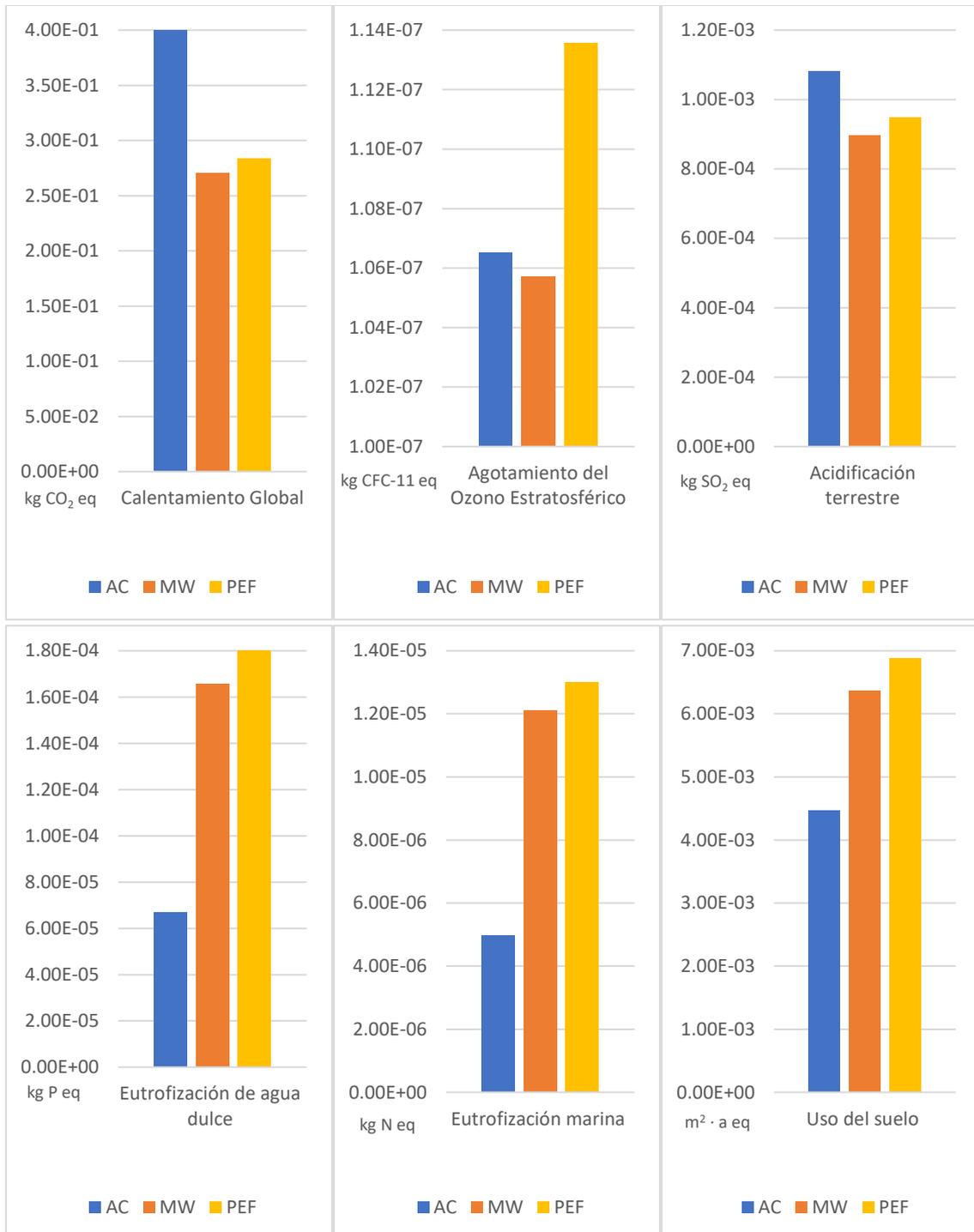


Figura 24. Impactos absolutos de los tratamientos de pasteurización por cada categoría de impacto.

5. Propuestas de Mejora

Se identifican diferentes propuestas de mejora a introducir en los distintos tratamientos de la industria alimentaria, con el propósito de llevarlas a la práctica.

- Reutilización del agua en el tratamiento por HHP, disminuyendo así el impacto en todas las categorías de impacto. Implicarían costes extra y también aumentar la superficie disponible industrial, para el almacenamiento del agua para su redistribución y recirculación.
- Modificar el tipo de envase, actualmente de polipropileno (PP), por alternativas como los bioplásticos, cartón o papel. También la utilización de plástico reciclado contribuye a un menor impacto en cada una de las categorías, todo ello dependiendo de la normativa vigente en el ámbito alimentario (Reglamento (CE) n° 282/2008 de la Comisión, de 27 de marzo de 2008, sobre materiales y objetos plásticos reciclados destinados a entrar en contacto con alimentos y que modifica el Reglamento (CE) n° 2023/2006).
- Transformar el consumo de energía procedente de fuentes renovables, también optar por el autoconsumo. Se cambiaría la tendencia de la combustión de combustibles fósiles para la generación de energía, en favor de alternativas renovables. Implementando planes de eficiencia energética.
- La corriente de vapor es abastecida por la industria química, el impacto principalmente se genera en su producción industrial ya que posteriormente se transporta hasta la industria alimentaria donde se consume. Como mejora, su producción in situ produciría menores impactos ambientales, disminuyendo los costes a largo plazo.
- Disminuir los tiempos de tratamiento siempre y cuando sea viable, sin modificar en gran medida las características originales de los alimentos.
- Adquirir materias primas, en este caso el tomate, procedentes de agricultura sostenible no intensiva, seleccionando proveedores certificados con buenas prácticas ambientales y bajas emisiones de carbono.
- Utilización de herramientas como el ecodiseño, integrando envases y mejorando la optimización de materiales.
- Compensación de emisiones para acercarse lo máximo posible a la neutralidad en carbono. Existe un registro creado por el Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, que recoge los esfuerzos de las organizaciones en el cálculo de las emisiones GEI de su actividad. Facilitando la compensación de la huella de carbono, mediante proyectos forestales de territorio nacional. Incluyendo beneficios ambientales y sociales, como son la absorción de CO₂ de la atmósfera (secuestro de carbono).

- Captura y aprovechamiento del CO₂, ya sea por absorción, fermentación, etc.
- Reforestación para compensar el CO₂ emitido durante los procesos industriales. Aunque la cantidad de árboles plantados depende mucho de la edad que tengan. Si el árbol es mayor, su capacidad de enraizar en el suelo es menor y su plantación es costosa. En cambio, si la planta es joven absorbe poco CO₂.

6. Conclusiones

En el caso de estudio se pretende llevar a cabo la aplicación de ACV a los tratamientos de pasteurización de la industria alimentaria. A pesar de las limitaciones de las nuevas tecnologías estudiadas, los datos han proporcionado resultados sólidos de impactos ambientales. Las conclusiones son específicas para cada tratamiento a estudio, se han identificado mejoras y criterios para la selección del tratamiento de pasteurización más adecuado y sostenible.

Las categorías de impacto se asocian a efectos intermedios (*midpoints*) que están cercanas a la intervención ambiental. Es decir, se puede actuar sobre las intervenciones para erradicarlas o disminuir el contacto con ellas. Las intervenciones ambientales se agrupan en los recursos que se consumen, las emisiones que se generan, etc. Por ejemplo, para la categoría de impacto calentamiento global, se puede asociar el CO₂ y CH₄ como cargas ambientales que se agrupan como intervenciones ambientales.

Las cargas ambientales asociadas a la categoría de calentamiento global son el CO₂, CFCs y N₂O, que con su presencia en la atmósfera provoca efecto invernadero. Si se controlan las emisiones de dichos compuestos, los impactos disminuirían.

La categoría de agotamiento del ozono estratosférico está ligada a la presencia de cloruros y bromuros procedentes de compuestos fluorocarbonados, CFCs, entre otros, que provocan la descomposición del ozono bajo la acción catalizadora de los rayos ultravioleta (UV). La interrupción de las emisiones de estos compuestos reduciría los impactos.

La acidificación terrestre como categoría de impacto, se inicia por consecuencia de la deposición de ácidos resultantes de la liberación de óxidos de nitrógeno y sulfuro en la atmósfera, suelo y agua, variando la acidez del medio. Se podría actuar sobre sustancias como los NO_x de origen industrial y menguarían los impactos.

La eutrofización incluye impactos por consecuencia de vertidos, emisores y otras fuentes con alta carga de nitrógeno y fósforo, la biomasa presente en el medio aumentaría y provocaría la disminución del oxígeno (DBO), derivando en condiciones anaerobias. La no liberación de estos compuestos mejoraría el ecosistema del medio marino o de agua dulce, disminuyendo los valores de impacto.

Por último, la categoría de uso del suelo es la más heterogénea, es complejo definir todas las conexiones de los ciclos biogeoquímicos en una evaluación cuantitativa, por el momento los indicadores guardan relación con la biodiversidad, por ejemplo, la pérdida de suelo y/o de organismos.

Finalmente, a pesar de ser el tratamiento por AC el menos contaminante en cuatro de las siete categorías de impacto, el uso de vapor y aire comprimido dificulta este tratamiento, ya que se traduciría en una transferencia de calor indirecta al zumo de tomate y siendo un proceso más largo en el tiempo. A la hora de seleccionar el tratamiento de pasteurización más sostenible, optaría por el MW o PEF, ya que solo consumen electricidad y agua, aunque el MW consume pequeñas cantidades de H_2O_2 que apenas aporta impacto ambiental. El uso eficiente de las materias primas, y los consumos de agua y electricidad renovable, provocarían una disminución de los impactos de estos dos tratamientos (MW y PEF), confirmando el apoyo a ambos tratamientos, resaltando de entre ellos el que menor impacto genere como tratamiento de pasteurización. Si aumenta el mix de renovables, se podría dar lugar a una pasteurización limpia.

7. Anexo al Trabajo Fin de Máster

Relación del TFG/TFM “ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROCESOS DE PASTEURIZACIÓN DE ALIMENTOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.			X	
ODS 2. Hambre cero.	X			
ODS 3. Salud y bienestar.			X	
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.		X		X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.		X		X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.				X
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.			X	X
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsables.	X			
ODS 13. Acción por el clima.		X		X
ODS 14. Vida submarina.		X		
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.		X		
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Descripción de la alineación del TFG/M con los ODS con un grado de relación más alto.

El TFM se planteó con el objetivo de investigar el sistema más eficiente y sostenible de tratamiento de pasteurización, a través de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

En todo caso, la estrategia implicaría integrar los ODS en la industria alimentaria, dando la oportunidad de generar actividades más inclusivas y sostenibles, demostrando un mayor compromiso social y con la sostenibilidad, aumentando la eficiencia de sus procesos y añadiendo más valor al producto.

Los ODS se estructuran en las siguientes dimensiones.

- Dimensión Social:

Las actuaciones que se llevan a cabo en este grupo se caracterizan por un alto grado de complementariedad e interrelación para seguir mejorando las condiciones de vida y bienestar, evitando situaciones de riesgo de pobreza, exclusión social, discriminación, desigualdad y marginación que afectan a los colectivos más vulnerables.

ODS 2. Hambre cero.

Poner fin al hambre desde una agricultura sostenible hasta conseguir mejorar la nutrición, pasando por lograr una seguridad alimentaria. Existiendo suficientes alimentos para dar de comer a todo el mundo, aún se encuentran muchos habitantes con escasez de alimentos. Los tratamientos investigados consiguen una buena conservación de los alimentos, si se desarrollan unos servicios y redes de apoyo a la distribución de los alimentos, estos podrían llegar a cualquier parte del mundo logrando una seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición. Se revertirían las situaciones de desigualdad que puedan generar problemas de hambre.

- Dimensión Medioambiental:

El desarrollo sostenible respalda la lucha contra el cambio climático y la protección del medio ambiente. También un consumo más sostenible que se mantenga en el tiempo.

ODS 6. Agua limpia y saneamiento.

El uso eficiente del agua garantiza una mayor disponibilidad del agua y su gestión sostenible. Los tratamientos a estudio consumen agua para la conservación de los alimentos, cada uno de ellos cuenta con sistemas diferentes de utilización de agua, por ello es importante el reciclado del agua y su reutilización, de esta forma se conseguiría reducir la huella hídrica.

ODS 7. Energía asequible y no contaminante.

Se pretende garantizar el acceso a la energía, que sea fiable y sostenible. Los tratamientos de pasteurización se engloban dentro de procesos eficientes según la tecnología disponible. La ambición es mejorar la tasa de eficiencia energética, por ello es importante continuar con la investigación en una energía sostenible y asequible, ya que la mejor tecnología disponible va avanzando.

ODS 12. Producción y consumo responsables.

El modelo de consumo actual no se mantendrá en pie si en los próximos decenios la población sigue creciendo, se pretende garantizar una modalidad de consumo y producción sostenible de alimentos, desarrollando la industrialización inclusiva y sostenible, fomentando la innovación. En los tratamientos de pasteurización estudiados, se pretende mejorar la gestión y promover el uso eficiente de los recursos naturales y las materias primas. El desperdicio alimentario de la cadena de producción se reduce si se aplican procedimientos de gestión, por ejemplo, el compostaje de la materia prima residual, que siendo orgánica se trata para beneficiar a la cadena de valor.

ODS 13. Acción por el clima.

Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, el cambio climático es consecuencia de la actividad humana y su forma de vida. Disminuir los riesgos ambientales para reducir los impactos ambientales que derivan en calentamiento global y numerosos efectos, que como consecuencia afectará a los habitantes del mundo. Desde la investigación de la industria alimentaria se pretende enfocar los procesos que contribuyan mayormente al impacto ambiental, actuando sobre ellos de tal forma que se disminuyan las emisiones de compuestos contaminantes.

ODS 14. Vida submarina.

Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, mares y los recursos marinos. Implantar medidas para gestionar y proteger sosteniblemente estos ecosistemas marinos. Los vertidos de la industria alimentaria se caracterizan por tener grandes aportes de materia orgánica, por ello, dentro de la industria se tratan las aguas residuales, de esta forma los vertidos al medio marino disminuyen y también su concentración de contaminantes. Se frena el deterioro de las aguas costeras y los océanos por la contaminación.

ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.

Gestionar sosteniblemente los bosques, invirtiendo la degradación de las tierras y pérdida de biodiversidad. La agricultura ecológica convive en consonancia con el ecosistema y la biodiversidad. Por ello, las materias primas que se utilizan en la industria alimentaria deberían proceder de zonas sostenibles, donde se vele por la conservación del territorio y los ecosistemas interiores de agua dulce.

8. Abreviaturas

AA	Agotamiento del Agua
AC	Autoclave
ACO	Agotamiento de la Capa de Ozono
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
AOE	Agotamiento del ozono estratosférico
AP	Potencial de Acidificación
AT	Acidificación Terrestre
CA	Consumo de Agua
CFC	Clorofluorocarbonos
CG	Calentamiento global
CH ₄	Metano
COVNM	Compuestos Orgánicos Volátiles No Metálicos
COVs	Compuestos Orgánicos Volátiles
CO ₂	Dióxido de Carbono
DAE	Demanda Acumulativa de Energía
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DEA	Demanda de Energía Acumulada
EAD	Ecotoxicidad del Agua Dulce
EC	Comunidad Europea
EICV	Evaluación del Inventario del Ciclo de Vida
EM	Eutrofización Marina
eq	Equivalente
ERF	Escasez de Recursos Fósiles
ERM	Escasez de Recursos Minerales
ET	Ecotoxicidad Terrestre
EVA	Etileno Vinil Acetato
EVAL	Etilen-Vinil-Alcohol
EVOH	Etilen-Vinil-Alcohol
FOET	Formación de Ozono en Ecosistemas Terrestres

FOSM	Formación de Ozono en la Salud Humana
FPF	Formación de Partículas Finas
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLO	Global
HDPE	Polietileno de Baja Densidad
HHP	Alta Presión Hidrostática
HPU	Ultrasonidos de Alta Potencia
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrógeno
ICV	Indicadores del Ciclo de Vida
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
ISO	Organización Internacional de Normalización
MAP	Envasado en Atmósfera Protectora
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
MW	Microondas
N	Nitrógeno
NH ₃	Amoniaco
NO _x	Óxidos de nitrógeno
N ₂ O	Óxido Nitroso
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OF	Oxidación Fotoquímica
P	Fósforo
PA	Potencial de Acidificación
PE	Potencial de Eutrofización
PEF	Campo Eléctrico Pulsado
PET	Tereftalato de Polietileno
PM	Materia Particulada
PP	Polipropileno
RER	Europa
RF	Radiofrecuencia
RI	Radiación Ionizante
RoW	Resto del Mundo
SO ₂	Dióxido de Azufre

TCH	Toxicidad Cancerígena Humana
TFM	Trabajo Final de Máster
THNC	Toxicidad Humana No Cancerígena
UF	Unidad Funcional
UNE	Una Norma Española
US	Uso del Suelo
UV	Ultravioleta

Referencias

- Abdul Karim Shah, N.; Shamsudin, R.; Abdul Rahman, R.; Adzahan, N. Fruit Juice Production Using Ultraviolet Pasteurization: A Review. *Beverages* 2016, 2 (3), 22. <https://doi.org/10.3390/beverages2030022>.
- Andersson, K., Ohlsson, T., Olsson, P., 1998. Screening life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study. *Journal of Cleaner Production* 6 (3-4), 277-288. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00027-4).
- Ankit Patras, Nigel Brunton, Sara Da Pieve, Francis Butler, Gerard Downey, Effect of thermal and high pressure processing on antioxidant activity and instrumental colour of tomato and carrot purées, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Volume 10, Issue 1, 2009, Pages 16-22, ISSN 1466-8564, <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.09.008>.
- Baboli, Z. M.; Williams, L.; Chen, G. Design of a Batch Ultrasonic Reactor for Rapid Pasteurization of Juices. *J. Food Eng.* 2020, 268 (September 2019), 109736. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109736>.
- Bermúdez-Aguirre, D.; Mobbs, T.; Barbosa-Cánovas, G. V. Ultrasound Applications in Food Processing. In *Food Engineering Series*; 2011. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7472-3_3.
- Calderón, L.A., Iglesias, L., Laca, A., Herrero, M., Díaz, M., 2010. The utility of Life Cycle Assessment in the ready meal food industry. *Resources, Conservation and Recycling* 54 (12), 1196-1207. Comparación de tratamientos en relación con el de máximo impacto.
- Canellada Barbón, F. (2017). Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono de una quesería tradicional asturiana.
- Contreras, A. M., Rosa, E., Pérez, M., Van Langenhove, H., and Dewulf, J. Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production* Vol. No. 17, 2009 pp. 772–779.
- Cruz Núñez, G. Evaluación del impacto ambiental de la elaboración de dos productos alimenticios en Cuba usando la herramienta Análisis del ciclo de vida. *Revista electrónica de Veterinaria*. ISSN 1695- 7504 2009 Vol.10 No. 4.
- Daesoo, K., Nutter., Greg, T., Franco M. Darin, Ulrich. R., Norris, Greg. Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *The International Journal of life cycle assessment*. Vol. 18 No.5. June 2013 pp. 1019-1035.
- Dubravka Skunca, Igor Tomasevic, Ivan Nastasijevic, Vladimir Tomovic, Ilija Djekic, Life cycle assessment of the chicken meat chain, *Journal of Cleaner Production*, Volume 184, 2018, Pages 440-450, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.274>.
- Espinoza, G. (2006). *Gestión y fundamentos de evaluación de impacto ambiental*. Santiago de Chile: BID-CED.

European Commission, 2006. Reference Document of Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries.

FAO, 2015. Food wastage footprint & climate change.

Fernández García, A., Butz, P., Bognàr, A. et al. Antioxidative capacity, nutrient content and sensory quality of orange juice and an orange-lemon-carrot juice product after high pressure treatment and storage in different packaging. *Eur Food Res Technol* 213, 290–296 (2001). <https://doi.org/10.1007/s002170100332>.

Gabriel Capson-Tojo, Renaud Escudié, Jean-Philippe Steyer, Angel Robles, CHAPTER 14 - Resource recovery from food waste via biological processes, Editor(s): Vinay Tyagi, Kaoutar Aboudi, Clean Energy and Resources Recovery, Elsevier, 2021, Pages 327-354, ISBN 9780323852234, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85223-4.00013-0>.

González Colín, M., Rosa Domínguez, E. R. y Rodríguez Rico, I.L. *Uso del Análisis del ciclo de vida en una industria de bebidas gaseosas*, 2006.

González-Velandia, K., Landázury-Correa, A., & Chaparro, A. (2020). Evaluación de impactos ambientales en la cadena de producción de huevos agroecológicos con un enfoque de ciclo de vida. *Revista De Ciencias Ambientales*, 54(2), 165-179. <https://doi.org/10.15359/rca.54-2.9>.

González Viera, D. y Socorro Quesada, M. Arroz, medio ambiente y desarrollo sostenible en Cuba. *Revista Agrotecnia de Cuba* 35 (1) / 2011: pp. 83-88.

Guillermo Pardo, Jaime Zufía. Life cycle assessment of food-preservation technologies. *Journal of Cleaner Production*. Volume 28. 2012, Pages 198-207. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.016>.

Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., 2001. *Life Cycle Assessment e An Operational Guide to the ISO Standards*. Centre of Environmental Science, Leiden, The Netherlands.

Hernando-Sáiz, A., Tárrago-Mingo, S., Purroy-Balda, F., Samson Tonello, C., 2008. Advances in design for successful commercial high pressure food processing. *Food Australia* 60 (4), 154-156.

Humbert, S., Rossi, V., Margni, M., Jolliet, O., Loerincik, Y., 2009. Life cycle assessment of two baby food packaging alternatives: glass jars vs. plastic pots. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 14 (2), 95-106. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0052-6>.

Jambrak, A. R.; Vukušić, T.; Stulić, V.; Mrvčić, J.; Milošević, S.; Šimunek, M.; Herceg, Z. The Effect of High Power Ultrasound and Cold Gas-Phase Plasma Treatments on Selected Yeast in Pure Culture. *Food Bioprocess Technol.* 2015, 8 (4), 791–800. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1442-3>.

Jež, M.; Błaszczak, W.; Zielińska, D.; Wiczowski, W.; Białobrzewski, I. Carotenoids and Lipophilic Antioxidant Capacities of Tomato Purées as Affected by High Hydrostatic Pressure Processing. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2020. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14231>.

Karlsdottir Marta R., Palsson, P. and Palsson, H. Factors for Primary Energy Efficiency and CO₂ Emission of Geothermal Power Production. Proceedings World Geothermal Congress Bali, Indonesia, pp. 25-29 April 2010.

Kasmaprapruet, S., Woranee P., Phanida S., Harnpon P. Life Cycle Assessment of Milled Rice Production: Case Study in Thailand European Journal of Scientific Research, Vol.30 No.2, 2009, pp.195-203.

Kaya, Z.; Unluturk, S. Pasteurization of Verjuice by UV-C Irradiation and Mild Heat Treatment. J. Food Process Eng. 2019, 42 (5), 1–11. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13131>.

Kemal Aganovic, Sergiy Smetana, Tara Grauwet, Stefan Toepfl, Alexander Mathys, Ann Van Loey, Volker Heinz, Pilot scale thermal and alternative pasteurization of tomato and watermelon juice: An energy comparison and life cycle assessment, Journal of Cleaner Production, Volume 141, 2017, Pages 514-525, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.015>.

Koutchma, T. UV Light for Processing Foods. Ozone Sci. Eng. 2008, 30 (1), 93–98. <https://doi.org/10.1080/01919510701816346>.

La Cava, E. L. M.; Sgroppo, S. C. Combined Effect of UV-C Light and Mild Heat on Microbial Quality and Antioxidant Capacity of Grapefruit Juice by Flow Continuous Reactor. Food Bioprocess Technol. 2019, 12 (4), 645–653. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-2239-1>.

Lado, B.H., Yousef, A.E., 2002. Alternative food-preservation technologies: efficacy and mechanisms. Microbes and Infection/Institute Pasteur 4 (4), 433-440. Retrieved from. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11932194>.

Leopold, L. B., F. E. Clarke, B. B. Hanshaw, and J. E. Balsley. 1971. A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey Circular 645, Washington, D.C.

López-Gómez, A.; Fernández, P. S.; Palop, A.; Periago, P. M.; Martínez-López, A.; Marin-Iniesta, F.; Barbosa-Cánovas, G. V. Food Safety Engineering: An Emergent Perspective. Food Eng. Rev. 2009. <https://doi.org/10.1007/s12393-009-9005-5>.

Lozano, F. J., Lozano, R., Freire, P., Jimenez-Gonzalez, C., Sakao, T., Ortiz, M. G., Viveros, T. (2018). New perspectives for green and sustainable chemistry and engineering: Approaches from sustainable resource and energy use, management, and transformation. Journal of Cleaner Production, 172, 227-232.

Mehta, D.; Sharma, N.; Bansal, V.; Sangwan, R. S.; Yadav, S. K. Impact of Ultrasonication, Ultraviolet and Atmospheric Cold Plasma Processing on Quality Parameters of Tomato-Based Beverage in Comparison with Thermal Processing. Innov. Food Sci. Emerg. Technol. 2019, 52 (May 2018), 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.01.015>.

Márquez Gómez, I., Análisis del ciclo de vida en la producción de zumo de mango ecológico. Tesis para optar por el título de máster en seguridad tecnológica y ambiental. Universidad Central de Las Villas, Cuba 2007.

Morris, C.; Brody, A. L.; Wicker, L. Non-Thermal Food Processing/Preservation Technologies: A Review with Packaging Implications. *Packag. Technol. Sci.* 2007, 20 (4), 275–286. <https://doi.org/10.1002/pts.789>.

Muller Nigri, E., Capanema de Barros, A., Ferreira Rocha, S. D., Romero Filho, E. Assessing environmental impacts using a comparative LCA of industrial and artisanal production processes: “Minas Cheese” case. *Food Science and Technology*, Vol. 34 No.3, July-Sept. 2014, pp. 522-531.

Murcia, M.A., Martínez-Tomé, M., Nicolás, M.C., Vera, A.M., 2003. Extending the shelf-life and proximate composition stability of ready to eat foods in vacuum or modified atmosphere packaging. *Food Microbiology* 20, 671-679. [https://doi.org/10.1016/S0740-0020\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0740-0020(03)00013-3).

Norton, T., Sun, D.-W., 2008. Recent advances in the use of high pressure processing as an effective technology in the food industry. *Food and Bioprocess Technology* 1 (1), 2-34. <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0007-0>.

Özogul, F., 2004. The effects of modified atmosphere packaging and vacuum packaging on chemical, sensory and microbiological changes of sardines (*Sardina pilchardus*). *Food Chemistry* 85 (1), 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.05.006>.

Pendyala, B.; Patras, A.; Ravi, R.; Gopisetty, V. V. S.; Sasges, M. Evaluation of UV-C Irradiation Treatments on Microbial Safety, Ascorbic Acid, and Volatile Aromatics Content of Watermelon Beverage. *Food Bioprocess Technol.* 2020, 13 (1), 101–111. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02363-2>.

Pereira, R.N., Vicente, A.A., 2010. Environmental impact of novel thermal and nonthermal technologies in food processing. *Food Research International* 43 (7), 1936-1943. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.013>.

Real Decreto 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 29 de marzo de 2014, núm. 77.

Santhirasegaram, V.; Razali, Z.; Somasundram, C. Safety Improvement of Fruit Juices by Novel Thermal and Nonthermal Processing. In *Food Hygiene and Toxicology in Ready-to-Eat Foods*; Elsevier, 2016; pp 209–223.

Saulis, G. (2010). Electroporation of cell membranes: The fundamental effects of pulsed electric fields in food processing. *Food Engineering Reviews*, 2, 52–73. <https://doi.org/10.1007/s12393-010-9023-3>.

Siguemoto, É. S.; Funcia, E. dos S.; Pires, M. N.; Gut, J. A. W. Modeling of Time-Temperature History and Enzymatic Inactivation of Cloudy Apple Juice in Continuous Flow Microwave Assisted Pasteurization. *Food Bioprod. Process.* 2018, 111, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.06.004>.

Sumnu, G. A Review on Microwave Baking of Foods. *International Journal of Food Science and Technology*. 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2001.00479.x>.

Toepfl S., Heinz V., Knorr D. (2006) Applications of Pulsed Electric Fields Technology for the Food Industry. In: Raso J., Heinz V. (eds) *Pulsed Electric Fields Technology*

for the Food Industry. Food Engineering Series. Springer, Boston, MA.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-31122-7_7.

Tukker, A., Huppes, G., Guinée, J.B., Heijungs, R., Koning, A., de & Oers, L.F.C.M., van & Suh, S., Geerken, T., Holderbeke, M., van & Jansen, B., Nielsen, P., 2006. Environmental Impacts of Products (EIPRO) - Analysis of the Life Cycle Environmental Impacts Related to the Final Consumption of the EU-25. European Commission, JRC e IPTS, Luxembourg.

Van den Bosch, H. F. M. (2007). Chamber design and process conditions for pulsed electric field treatment of food. Woodhead Publishing series in food science, technology and nutrition. (pp. 70–93). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9781845693831.1.70>.

Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2009). Electrotechnologies for extraction from food plants and biomaterials. Food engineering series. New York, NY: Springer New York.

Zhang, W.; Yu, Y.; Xie, F.; Gu, X.; Wu, J.; Wang, Z. High Pressure Homogenization versus Ultrasound Treatment of Tomato Juice: Effects on Stability and in Vitro Bioaccessibility of Carotenoids. *Lwt* 2019, 116 (800), 108597.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108597>.